

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA
E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE Y DEL TERRITORIO

Programa de Doctorado
Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE FISURACIÓN EN LAS
MEZCLAS BITUMINOSAS MEDIANTE EL DESARROLLO
DE UN NUEVO ENSAYO EXPERIMENTAL
- ENSAYO FÉNIX -**

Realizada por:
GONZALO ALFONSO VALDÉS VIDAL

Director:
DR. FÉLIX EDMUNDO PÉREZ JIMÉNEZ

Barcelona - España
2011



***A Dios,
a mi esposa Lourdes, a mis hermosas hijas Martina y Catalina,
y a mis padres Julio y Marcia por su apoyo en todos mis proyectos.***



Al Doctor Félix E. Pérez Jiménez, por su amistad y enseñanza. Por guiarme y dirigirme en toda la etapa de mis estudios doctorales.

A la Universidad de La Frontera y al Gobierno de Chile por haberme brindado el apoyo para perfeccionarme durante mis estudios doctorales.

A los Doctores Rodrigo Miró y Adriana Martínez, por estar siempre dispuestos a brindarme su apoyo, amistad y orientación en las distintas fases de mi perfeccionamiento en la Universidad Politécnica de Cataluña.

A José Amorós, por su amistad, amabilidad y disposición en las tareas de laboratorio emprendidas durante la fase experimental de mi tesis doctoral.

A Jordi Martín por su amistad y apoyo en los trabajos de laboratorio, que se tradujo en que los ensayos se llevaran a cabo en las mejores condiciones.

A mis amigos y compañeros de doctorado Oscar Reyes, Ramón Botella, Josep Pedret, Mario Salazar, Alfredo Hernández y Juan Campana, por su amistad y los gratos momentos que compartimos estudiando, trabajando y disfrutando durante esta gran etapa.

A los amigos que hice en la ciudad de Barcelona: Rodrigo C., Úrsula, Rodrigo U., Caro, Galo, Vicky, Carlos, Silvia, José Miguel, Klaudia, Cristián, Claudia, Vero, Raúl, Oscar M., Ivana, Jorge, Zhifeng, Vladimir y Xavi, por los buenos momentos que disfrutamos en estos años.

A mis suegros Luis y Fresia por su gran apoyo en estos años.



RESUMEN

Las solicitaciones producidas por las repetidas cargas del paso de los vehículos y las condiciones ambientales van dando lugar a un deterioro continuo de las capas bituminosas que se emplean en la estructura del firme, degenerando sus propiedades mecánicas, lo que lleva consigo una pérdida estructural y funcional de las carreteras.

Uno de los deterioros más frecuentes en las capas bituminosas es el fallo por fisuración, originado principalmente por dos factores: las variaciones térmicas y la fatiga del material, este último, producto de las repetidas aplicaciones de carga que solicitan al firme. Estos fallos se inician mediante microfisuras en el material, y a medida que progresan, la estructura se debilita, permitiendo la infiltración del agua, lo que conlleva a sufrir severos daños estructurales en el firme y serias consecuencias económicas para los organismos encargados de la construcción y gestión de las carreteras.

De acuerdo a lo señalado, desde hace un tiempo atrás, muchos investigadores han tratado de abordar la caracterización de las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas relacionadas con el deterioro de fisuración, principalmente por medio de ensayos experimentales. En esta línea de investigación, el Laboratorio de Caminos de la UPC, ha trabajado en el desarrollo de procedimientos para caracterizar y comprender mejor los mecanismos de deterioro que afectan a las mezclas bituminosas.

Por ello, en esta Tesis Doctoral, y en el marco del proyecto de investigación FÉNIX, se ha profundizado en esta temática, desarrollando un nuevo procedimiento que pudiera caracterizar las propiedades mecánicas de fractura de las mezclas bituminosas, de una manera simple y sencilla, de manera tal, que se pueda evaluar las fases de inicio y propagación de fisuras que sufren las mezclas bituminosas cuando éstas son solicitadas. Este procedimiento fue llamado ensayo Fénix.

Por otra parte, se abarca también en este trabajo de investigación, el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas, y sus relaciones con las propiedades mecánicas obtenidas por medio del procedimiento propuesto, desarrollando así, un mecanismo que permite estimar rápidamente el comportamiento a fatiga de una mezcla bituminosa, a partir de un procedimiento más rápido y económico, como lo es el ensayo Fénix.



ABSTRACT

The stresses caused by traffic repeated loading and environmental conditions give rise to a continuous distress of the bituminous layers that make up a pavement, a decrease of their mechanical properties. Subsequently these stresses entail a structural and functional loss in the highways.

One of the most frequent distresses in bituminous layers is fatigue cracking, mainly caused by two factors: thermal variation and material fatigue, being this last one a consequence of the repeated load applications on the pavement. These failures begin with microcracks in the material and, as they propagate, the structure weakens, allowing water infiltration and leading the pavement to severe structural damage and highway construction and management administrations to serious financial consequences.

In accordance with the above statements, many researchers have tried to deal with the mechanical properties characterization of bituminous mixtures related to cracking distresses, basically through experimental testing. In this research line, the Road Research Laboratory of the UPC has worked on the development of procedures aimed to better characterize and understand distress mechanisms that bituminous mixtures undergo.

Therefore, the objective of this doctoral thesis is to study this topic in depth, within the FENIX Project framework, by developing a new procedure able to characterize the fracture mechanical properties of bituminous mixtures in a simple way that enables the assessment of the cracking initiation and propagation stages. This procedure was called Fénix.

Furthermore, the fatigue behaviour of bituminous mixtures is also analyzed in this research study, as well as the relationships between the mechanical properties obtained with the proposed procedure. Thus, a method to quickly estimate the fatigue behaviour of a bituminous mixture is developed from a simpler and faster procedure, that is, Fénix test.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1	INTRODUCCIÓN	2
1.2	OBJETIVOS	6
1.2.1	Enfoques de mecanismos de fisuración y ensayos para su evaluación	6
1.2.2	Desarrollo de un nuevo ensayo para la evaluación de la respuesta de las mezclas bituminosas frente al deterioro de fisuración	6
1.2.3	Evaluación de la resistencia a la fisuración de mezclas bituminosas	6
1.2.4	Determinación de una correlación entre parámetros mecánicos del ensayo estático a tracción con el comportamiento a fatiga	7
1.2.5	Diseño de mezclas	7

CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1	INTRODUCCIÓN	9
2.2	TIPOS DE FIRMES	12
2.3	AGENTES SOLICITANTES DE LOS PAVIMENTOS	13
2.4	DETERIOROS EN PAVIMENTOS BITUMINOSOS	15
2.4.1	Fisuración por fatiga	16
2.4.2	Fisuración en bloque	17
2.4.3	Fisuración de borde	18
2.4.4	Fisuración longitudinal	19
2.4.5	Fisuración por reflexión de juntas	20
2.4.6	Fisuración transversal	21
2.5	PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS VINCULADAS CON LA RESISTENCIA AL FALLO POR FISURACIÓN	22
2.5.1	Módulo de Rigidez	22
2.5.2	Contenido de Huecos	23
2.5.3	Vacíos de agregado mineral (VMA)	24
2.5.4	Contenido de betún y espesor de recubrimiento	24



2.5.5	Consistencia y viscosidad del betún	25
2.5.6	Granulometría y tipo del árido.	27
2.6	MODOS DE PROPAGACIÓN DE FISURAS	30
2.7	ENFOQUES DE LOS MECANISMOS DE FISURACIÓN EN MEZCLAS BITUMINOSAS	33
2.7.1	Tenacidad	34
2.7.1.1	Concepto de energía disipada en el proceso de fractura	37
2.7.1.2	Ensayos para determinar energía de fractura en mezclas bituminosas	39
	• Single - edge notched beam, SE(B).	40
	• Disk-shaped compact tension test, DC(T)	41
	• Semi-circular bending test, SCB	42
	• Barcelona tracción directa, BTD	45
	• Cataluña tracción directa, CTD	46
	• Dog-bone direct tension, DBDT	47
2.7.2	Fatiga	51
2.7.2.1	La fatiga en mezclas bituminosas	52
2.7.2.2	Ensayos para evaluar la respuesta a fatiga en mezclas bituminosas	57
2.7.2.3	Criterios de fallo aplicados a la fatiga de mezclas bituminosas	60
	• Enfoque tradicional o clásico	60
	• Enfoque de energía disipada	61
	• Enfoque de la deformación crítica	63
2.7.2.4	Predicción del comportamiento a fatiga de las mezclas	64

CAPÍTULO 3. ESTUDIOS REALIZADOS Y TRABAJO EXPERIMENTAL

3.1	INTRODUCCIÓN	70
3.2	METODOLOGÍA	71
3.2.1	Ensayo Fénix	71
3.2.1.1	Objetivos y alcance del ensayo Fénix	71
3.2.1.2	Metodología del ensayo Fénix	72
3.2.1.3	Tensiones generadas en el ensayo Fénix	74
3.2.1.4	Parámetros resultantes del ensayo Fénix	77
3.2.2	Ensayo a fatiga a flexotracción dinámica en tres puntos, UNE-EN 12697-24.	81
3.2.2.1	Objetivos y alcance del ensayo a fatiga	81



3.2.2.2	Metodología del ensayo a fatiga	81
3.2.2.3	Parámetros resultantes del ensayo de fatiga a flexotracción dinámica	83
3.3	PLAN DE TRABAJO EXPERIMENTAL	85
3.3.1	Primera fase experimental: Validación del ensayo Fénix	86
3.3.2	Segunda fase experimental: Comportamiento a fatiga de las mezclas	87
3.3.3	Materiales empleados	87
	• Betunes	87
	• Áridos	88
	• Granulometrías	89

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL ENSAYO FÉNIX. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1	INTRODUCCIÓN	95
4.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL	95
4.3.1	Influencia de la velocidad de aplicación de carga	95
4.3.2	Influencia del envejecimiento	96
4.3.3	Influencia del tipo de betún utilizado y temperatura de ensayo	98
4.3.4	Influencia del porcentaje de betún utilizado y temperatura de ensayo	109
4.3.5	Influencia de la temperatura de compactación	123
4.3.6	Influencia del material reciclado (RAP)	123
4.3	ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS DEL ENSAYO FÉNIX	124
4.3.1	Estudio de la repetibilidad del ensayo Fénix	125
4.3.2	Estudio de la sensibilidad del ensayo Fénix	127

CAPÍTULO 5. PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE LAS MEZCLAS MEDIANTE EL ENSAYO FÉNIX

5.1	INTRODUCCIÓN	135
5.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS	136
5.2.1	Análisis del comportamiento a fatiga de las mezclas evaluadas	136
5.2.2	Leyes de fatiga	140



5.2.3	Resultados del ensayo Fénix	143
5.2.4	Predicción del comportamiento a fatiga de las mezclas por medio del ensayo Fénix	146

CAPÍTULO 6. APLICACIÓN DEL ENSAYO FÉNIX AL DISEÑO DE MEZCLAS RESISTENTES A FATIGA

6.1	INTRODUCCIÓN	151
6.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS	152
6.2.1	Análisis del efecto de contenido de ligante en mezclas rígidas y dúctiles.	152
6.2.2	Análisis del comportamiento a fatiga mezclas rígidas y dúctiles.	155
6.3	APLICACIÓN DEL ENSAYO FÉNIX AL DISEÑO DE MEZCLAS RESISTENTES A FATIGA	158

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

7.1	CONCLUSIONES	163
7.2	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	169

REFERENCIAS



INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Fig. 1- 1	Ejemplo modelo de deterioro de un pavimento	3
Fig. 1- 2	Tipos de fisuración en pavimentos bituminosos	5

CAPÍTULO 2

Fig. 2- 1	Producción total anual de mezclas bituminosas fabricadas en caliente en los países mayores productores de Europa	11
Fig. 2- 2	Producción total anual de mezclas bituminosas fabricadas en caliente	11
Fig. 2- 3	Tensiones producidas por el tráfico en capas de firme flexible	13
Fig. 2- 4	Esfuerzos y deformaciones generados en el pavimento por las cargas del tráfico	14
Fig. 2- 5	Tensiones generadas por variaciones térmicas	14
Fig. 2- 6	Efecto conjunto tráfico y medioambiente sobre la serviciabilidad de un pavimento	15
Fig. 2- 7	Deterioro por fatiga en diferentes niveles de severidad - (a), Bajo, (b), Moderado, (c) Alto	17
Fig. 2- 8	Fisuración en bloque	18
Fig. 2- 9	Fisuración de borde	18
Fig. 2- 10	Tipos de fisuración longitudinal	19
Fig. 2- 11	Fisuración longitudinal descendente - top down cracking	20
Fig. 2- 12	Fisuración por reflexión de juntas	21
Fig. 2- 13	Fisuración Transversal	21
Fig. 2- 14	Efecto del módulo de rigidez y el envejecimiento en el ratio de tensiones térmicas entre superficie y base de una capa asfáltica, según su espesor (Fuente: Nesnas y Nunn, 2004)	22
Fig. 2- 15	Efecto del contenido de huecos en la energía de fractura en mezclas bituminosas	23
Fig. 2- 16	Efecto del contenido de huecos y contenido betún en la vida a fatiga y en el módulo de rigidez inicial de mezclas bituminosas	24
Fig. 2- 17	Efecto del espesor de recubrimiento del betún en las mezclas bituminosas	25
Fig. 2- 18	Efecto del tipo de árido en la energía de fractura a bajas temperaturas en mezclas bituminosas	28



Fig. 2- 19	Efecto del tipo de árido en la superficie de fractura a bajas temperaturas en mezclas bituminosas, (a) áridos calizos y (b) áridos graníticos	28
Fig. 2- 20	Variación de la energía específica de fractura con la concentración volumétrica de filler para 0 y 7 días de envejecimiento	29
Fig. 2- 21	Efecto del tipo de árido en la resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas	30
Fig. 2- 22	Mecanismos desarrollados durante el proceso de fisuración	31
Fig. 2- 23	Tres modos fundamentales de propagación de fisuras	32
Fig. 2- 24	Esquema de una fisura en un material (a) Frágil (b) Dúctil (c) Cuasi frágil	35
Fig. 2- 25	Geometría modo I de fractura	35
Fig. 2- 26	Curvas tensión desplazamiento en materiales frágiles (a) y cuasi frágiles (b)	36
Fig. 2- 27	Curva fuerza – desplazamiento resultante en ensayos de tracción en materiales cuasi frágiles y zonas características en el proceso de fractura de materiales cuasi frágiles, modo I de fractura	37
Fig. 2- 28	Forma esquemática de la obtención de la energía de fractura	38
Fig. 2- 29	Esquema del movimiento entre planos atómicos	38
Fig. 2- 30	Esquema y curvas carga – desplazamiento resultantes del ensayo SE(B)	41
Fig. 2- 31	Montaje ensayo DC(T) y geometría recomendada	41
Fig. 2- 32	Montaje y esquema del ensayo SCB	42
Fig. 2- 33	Campo tensional ensayo SCB modelado mediante comportamiento elástico lineal	43
Fig. 2- 34	Curva carga - deflexión ensayo SCB	44
Fig. 2- 35	Curva carga-desplazamiento de los ensayos DC(T) y SCB a diferentes temperaturas	44
Fig. 2- 36	Montaje, esquema y curva carga – desplazamiento del ensayo BTB	45
Fig. 2- 37	Curvas fuerza - desplazamiento (BTB) para evaluar la tenacidad del ligante B 60/70 a diferentes temperaturas de ensayo	46
Fig. 2- 38	Montaje del ensayo CTD y superficie de fractura de probeta ensayada	47
Fig. 2- 39	Montaje del ensayo DBDT (a) y la probeta una vez realizado el ensayo (b)	48
Fig. 2- 40	Curva de Wöhler – Tensión v/s Log N° de ciclos de carga - Límite de fatiga	51
Fig. 2- 41	Curva de Wöhler Log Tensión, Log Deformación v/s Log N° de ciclos de carga	52
Fig. 2- 42	Tensiones y deformaciones producidas por cargas de tráfico en las capas bituminosas del firme, y pavimento fisurado severamente por fatiga.	53
Fig. 2- 43	Fases de degradación por el fenómeno de fatiga	54
Fig. 2- 44	Propagación de la fisura mediante ensayo de fatiga	56
Fig. 2- 45	Ley de Fatiga con límite de fatiga	56
Fig. 2- 46	Procedimientos para determinar el comportamiento a fatiga en mezclas bituminosas	58



Fig. 2- 47	Ensayo de fatiga de viga a flexotracción en tres puntos.	59
Fig. 2- 48	Función carga y desplazamiento en el ciclo 200 de probeta ensayada a fatiga a flexotracción	59
Fig. 2- 49	Criterio clásico de fallo por fatiga.	60
Fig. 2- 50	Ley de fatiga de una mezcla bituminosa mediante ensayo a flexotracción en tres puntos	61
Fig. 2- 51	Ciclo de histéresis curva tensión – deformación	62
Fig. 2- 52	Definición de ciclo de fallo mediante el criterio de ratio de energía disipada, en ensayos a tensión y deformación controlada	63
Fig. 2- 53	Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga.	64
Fig. 2- 54	Correlación entre factores K1 y K2 de la ley de fatiga para mezclas bituminosas utilizadas en capas de base e intermedias.	66
Fig. 2- 55	Correlación entre valores de Resistencia a Tracción Indirecta y constante K1 de la ley de fatiga.	66
Fig. 2- 56	Nomograma para determinar la ley de fatiga de una mezcla a partir del ensayo CTD	67

CAPÍTULO 3

Fig. 3 - 1	Fabricación probeta Fénix, corte e inducción de fisura (plano diametral de corte)	73
Fig. 3 - 2	Fabricación probeta Fénix, pegado de placas metálicas	73
Fig. 3 - 3	Montaje ensayo Fénix en prensa MTS con cámara ambiental	73
Fig. 3 - 4	Campo tensional a tracción en probeta ensayo Fénix, GID ® Software	74
Fig. 3 - 5	Esquema de la probeta. Diagrama de esfuerzos	75
Fig. 3 - 6	Área resistente de la probeta	75
Fig. 3 - 7	Esquema de tensiones producidas en el ensayo Fénix	77
Fig. 3 - 8	Curva carga-desplazamiento ensayo Fénix.	77
Fig. 3 - 9	Preparación de las probetas para el ensayo de fatiga en flexotracción dinámica	82
Fig. 3 - 10	Probeta para el ensayo de fatiga en flexotracción dinámica	82
Fig. 3 - 11	Variables analizadas en el desarrollo del ensayo Fénix	86
Fig. 3 - 12	Ubicación de la cantera de áridos Foj	89
Fig. 3 - 13	Curva granulométrica mezcla S-12	90
Fig. 3 - 14	Curva granulométrica mezcla S-20	90
Fig. 3 - 15	Curva granulométrica mezcla G-20	90
Fig. 3 - 16	Huso granulométrico S-12 y granulometría fórmula de trabajo mezcla S-12 R40	92



Fig. 3 - 17	Huso granulométrico S-20 y granulometría fórmula de trabajo mezcla S-20 R60	92
-------------	---	----

CAPÍTULO 4

Fig. 4 - 1	Curvas carga – desplazamiento mezcla S-12 a distintas velocidades a aplicación de carga	96
Fig. 4 - 2	Proceso de envejecimiento de probetas establecido por SHRP	97
Fig. 4 - 3	Curvas carga – desplazamiento mezcla S-12 (envejecida) a distintas velocidades de aplicación de carga	98
Fig. 4 - 4	Curvas carga – desplazamiento, mezcla S-20, temperatura de ensayo -10 °C	99
Fig. 4 - 5	Curvas carga – desplazamiento, mezcla S-20, temperatura de ensayo 5 °C	101
Fig. 4 - 6	Curvas carga – desplazamiento, mezcla S-20, temperatura de ensayo 20 °C	101
Fig. 4 - 7	Curvas carga máxima a tracción – temperatura de ensayo, mezcla S-20	102
Fig. 4 - 8	Curvas resistencia a tracción – temperatura de ensayo, mezcla S-20	103
Fig. 4 - 9	Curvas desplazamiento a carga máxima – temperatura de ensayo, mezcla S-20	104
Fig. 4 - 10	Curvas desplazamiento de rotura – temperatura de ensayo, mezcla S-20	104
Fig. 4 - 11	Curvas índice de rigidez a tracción – temperatura de ensayo, mezcla S-20	105
Fig. 4 - 12	Curvas desplazamiento al 50% Fmax postpico – temperatura de ensayo, mezcla S-20	106
Fig. 4 - 13	Curvas energía disipada – temperatura de ensayo, mezcla S-20	107
Fig. 4 - 14	Curvas índice de energía – temperatura de ensayo, mezcla S-20	108
Fig. 4 - 15	Curvas índice de tenacidad – temperatura de ensayo, mezcla S-20	109
Fig. 4 - 16	Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo -10 °C	111
Fig. 4 - 17	Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo 5 °C	112
Fig. 4 - 18	Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo 20 °C	112
Fig. 4 - 19	Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo -10 °C	113
Fig. 4 - 20	Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo 5°C	114
Fig. 4 - 21	Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo 20°C	115
Fig. 4 - 22	Curvas carga máxima a tracción – temperatura de ensayo, mezcla G-20	116
Fig. 4 - 23	Curvas resistencia a tracción – temperatura de ensayo, mezcla G-20	116
Fig. 4 - 24	Curvas desplazamiento a carga máxima – temperatura de ensayo, mezcla G-20	117
Fig. 4 - 25	Curvas desplazamiento de rotura – temperatura de ensayo, mezcla G-20	118
Fig. 4 - 26	Curvas índice de rigidez a tracción – temperatura de ensayo, mezcla G-20	119
Fig. 4 - 27	Curvas desplazamiento al 50%Fmax postpico – temperatura de ensayo,	



	mezcla G-20	119
Fig. 4 - 28	Curvas energía disipada – temperatura de ensayo, mezcla G-20	120
Fig. 4 - 29	Curvas índice de energía – temperatura de ensayo, mezcla G-20	121
Fig. 4 - 30	Superficies de fractura a distintas temperaturas en probetas Fénix, mezcla G-20	122
Fig. 4 - 31	Curvas índice de tenacidad – temperatura de ensayo, mezcla G-20	122
Fig. 4 - 32	Curvas carga – desplazamiento, mezclas S-20 a distintas temperaturas de compactación.	123
Fig. 4 - 33	Curvas carga – desplazamiento, mezclas recicladas S-20 R60 y S-12 R40	124

CAPÍTULO 5

Fig. 5 - 1	Curvas de deformación unitaria versus número de ciclos, ensayo a fatiga a flexotracción, 20 °C	137
Fig. 5 - 2	Curvas de módulo dinámico versus número de ciclos, ensayo a fatiga a flexotracción, 20 °C	138
Fig. 5 - 3	Curvas de deformación unitaria versus número de ciclos, ensayo a fatiga a flexotracción, 5°C	139
Fig. 5 - 4	Curvas de módulo dinámico versus número de ciclos, ensayo a fatiga a flexotracción, 5°C	139
Fig. 5 - 5	Leyes de fatiga de mezcla G-20, betunes B13/22 y B60/70, a 5 y 20 °C	141
Fig. 5 - 6	Leyes de fatiga de mezcla S-20, betunes B13/22 y B60/70, a 5 y 20 °C	141
Fig. 5 - 7	Leyes de fatiga de mezclas con altas tasas de RAP, S-20 R60 y S-12 R40, a 20 °C	142
Fig. 5 - 8	Curvas carga – desplazamiento Mezcla G-20, 5% betún s/a	143
Fig. 5 - 9	Curvas carga – desplazamiento Mezcla S-20, 5% betún s/a	144
Fig. 5 - 10	Curvas carga – desplazamiento Mezclas con alto contenido de RAP	144
Fig. 5 - 11	Correlación entre Módulo Dinámico del ensayo de fatiga a flexotracción y el índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix	147
Fig. 5 - 12	Correlación entre parámetro “b” de la ley de fatiga a flexotracción y el índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix	148
Fig. 5 - 13	Correlación entre parámetro “a” de la ley de fatiga a flexotracción y el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico del ensayo Fénix	149
Fig. 5 - 14	Correlaciones de los parámetros Fénix con los de la ley de fatiga a flexotracción	149



CAPÍTULO 6

Fig. 6 - 1	Efecto del tipo y contenido de betún sobre la relación $I_{RT} - I_T$, Mezcla G-20 a diferentes temperaturas de ensayo	153
Fig. 6 - 2	Efecto del tipo y contenido de betún sobre la relación $I_{RT} - \Delta_{mdp}$, Mezcla G-20 a diferentes temperaturas de ensayo	154
Fig. 6 - 3	Efecto del tipo y contenido de betún sobre la relación $I_{RT} - G_D$, Mezcla G-20 a diferentes temperaturas de ensayo	154
Fig. 6 - 4	Índice de rigidez a tracción versus Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico	156
Fig. 6 - 5	Índice de rigidez a tracción versus Energía disipada en el proceso de fisuración	157
Fig. 6 - 6	Índice de rigidez a tracción versus Índice de tenacidad	157
Fig. 6 - 7	Índice de rigidez a tracción vs. Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico	160
Fig. 6 - 8	Índice de rigidez a tracción vs. Energía disipada en el proceso de fisuración	160
Fig. 6 - 9	Índice de rigidez a tracción vs. Índice de tenacidad	161



ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2- 1	Evolución de la red de carreteras del estado (Fuente: Ministerio de Fomento)	10
Tabla 2- 2	Fallos catalogados por grupos en pavimentos bituminosos	16
Tabla 2- 3	Diferentes geometrías de los ensayos desarrollados para determinar propiedades de fractura en las mezclas bituminosas	50

CAPÍTULO 3

Tabla 3- 1	Variable analizadas en ensayo de fatiga a flexotracción	87
Tabla 3- 2	Propiedades de los betunes empleados en las fases experimentales de la investigación	88
Tabla 3- 3	Propiedades del árido utilizado	89
Tabla 3- 4	Granulometrías de mezclas convencionales utilizadas en el estudio experimental	91
Tabla 3- 5	Granulometría del RAP tras extracción del ligante	91
Tabla 3- 6	Granulometría de las mezclas recicladas S-12 R40 y S-20 R60	93

CAPÍTULO 4

Tabla 4 - 1	Parámetros medios resultantes mezcla S-20 de acuerdo a tipo de betún y temperatura de ensayo	100
Tabla 4 - 2	Parámetros medios resultantes del ensayo Fénix, mezcla G-20 de acuerdo al tipo y contenido de betún, y temperatura de ensayo.	110
Tabla 4 - 3	Coeficientes de Variación de los Parámetros Fénix, Temperatura de Ensayo -10 °C	126
Tabla 4 - 4	Coeficientes de Variación de los Parámetros Fénix, Temperatura de Ensayo 5 °C	126
Tabla 4 - 5	Coeficientes de Variación de los Parámetros Fénix, Temperatura de Ensayo 20 °C	127
Tabla 4 - 6	Valores Promedio de los Coeficientes de Variación de los Parámetros Fénix	127
Tabla 4 - 7	Análisis ANOVA para comparar en efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo en la carga máxima, F_{max}	129
Tabla 4 - 8	Análisis ANOVA para comparar en efecto del tipo de ligante y temperatura	



	de ensayo en el índice rigidez a tracción, I_{RT}	129
Tabla 4 - 9	Análisis ANOVA para comparar en efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo en el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp}	129
Tabla 4 -10	Análisis ANOVA para comparar en efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo en la energía disipada, G_D	130
Tabla 4 -11	Análisis ANOVA para comparar el efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo en la carga máxima, F_{max}	131
Tabla 4 -12	Análisis ANOVA para comparar el efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo en el índice de rigidez a tracción, I_{RT}	131
Tabla 4 -13	Análisis ANOVA para comparar el efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo en el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp}	132
Tabla 4 -14	Análisis ANOVA para comparar el efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo en la energía disipada, G_D	133
Tabla 4 -15	Resumen de sensibilidad de los parámetros Fénix	133

CAPÍTULO 5

Tabla 5 - 1	Módulos dinámicos y leyes de fatiga de las mezclas evaluadas	140
Tabla 5 - 2	Parámetros medios resultantes del ensayo Fénix para las mezclas evaluadas.	145
Tabla 5 - 3	Parámetros correlacionados entre el ensayo Fénix y el ensayo de fatiga a flexotracción	146



CAPÍTULO 1

Introducción y Objetivos



1.1 INTRODUCCIÓN

No cabe duda de que el desarrollo económico y social de un país está estrechamente ligado a un correcto funcionamiento de los sistemas de transporte. Las infraestructuras viales juegan un rol importante dentro del sistema de transporte de cada país, y en éstas, las carreteras son el elemento principal que inciden en el desplazamiento de los vehículos que permiten el traslado de personas y mercancías desde un punto a otro.

El firme es el elemento básico en los caminos y carreteras, debido principalmente a la importancia que tiene su funcionalidad dentro de la operación de la infraestructura. Por lo tanto, el firme es generalmente diseñado para tener una vida de servicio durante la cual entregue la superficie requerida para los desplazamientos de los diferentes medios de transportes, proporcionando comodidad y seguridad a la circulación de los vehículos, y a su vez, una estructura tal, que permita que su duración sea la prevista en su etapa de diseño.

El pavimento es la parte del firme que requiere la mayor inversión de recursos económicos, tanto en su etapa de construcción como en su etapa de mantenimiento. El estado del pavimento influye directamente en la mayoría de los costos del usuario de la carretera, aumentándolos cuando su estado no es óptimo, debido principalmente a los aumentos en tiempos de viajes, consumo de combustible y deterioro de los vehículos de transportes, entre muchos otros costos involucrados (De Solminihaç, 2001). Sin embargo, con el transcurso del tiempo las características iniciales del pavimento van degenerándose (Fig. 1- 1), provocando de manera progresiva, deterioros que implican la intervención de la estructura mediante tareas de mantenimiento o conservación, o bien, cuando el deterioro es excesivo, se requiere llevar a cabo tareas de rehabilitación o reconstrucción.

De acuerdo a lo anterior, en los países desarrollados, gran parte de los estudios van enfocados a las capas superiores del firme, y estos estudios tratan de explicar su comportamiento, caracterizando y modelizando los elementos que influyen directamente en el pavimento, estableciendo los parámetros que intervienen en los deterioros originados por la interacción del pavimento con los diferentes agentes solicitantes. La finalidad de los estudios desarrollados apunta a ampliar los conocimientos científicos que permitan asegurar la durabilidad de los pavimentos durante los periodos de diseño.

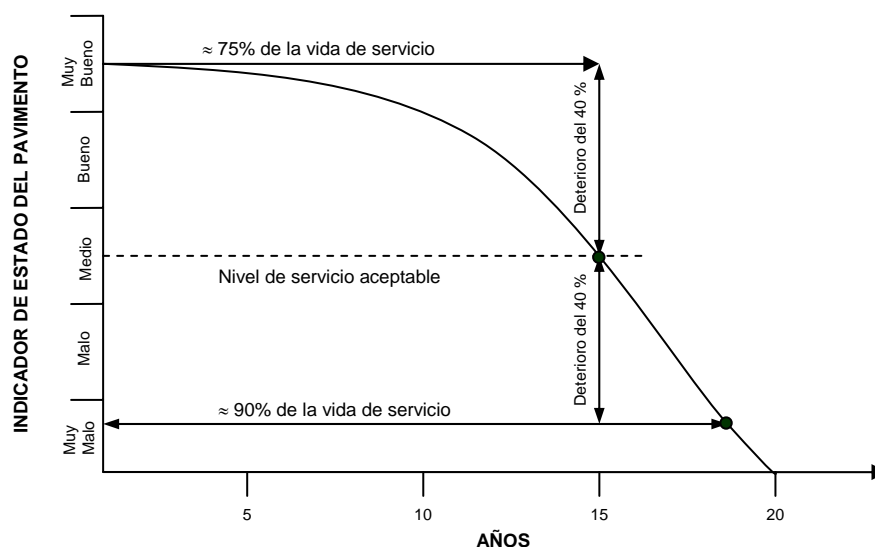


Fig. 1- 1 Ejemplo modelo de deterioro de un pavimento
(Fuente: Kraemer et al., 2004)

Debido a las características funcionales y estructurales entregadas, hoy en día, los pavimentos bituminosos son los más empleados en la construcción de las redes de carreteras de los diferentes países, y de la calidad y diseño de las mezclas bituminosas depende en gran parte su comportamiento en la fase de operación o servicio (Pérez et al., 2006).

El ensayo más habitual utilizado para el diseño y control de las mezclas bituminosas es el ensayo Marshall. Este ensayo, en su forma actual, surgió de una investigación iniciada por el Cuerpo de ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en el año 1943. Su desarrollo fue motivado por la necesidad de buscar una metodología de diseño y control en las pistas de aeropuertos en la Segunda Guerra Mundial. A pesar de ser uno de los ensayos más ampliamente conocidos y utilizados para la dosificación y control de mezclas bituminosas, son varios los investigadores que concuerdan que la información obtenida de este ensayo es compleja de evaluar teóricamente, y más aún, precisar qué propiedad de la mezcla se evalúa a través de la estabilidad Marshall. Algunos autores citan que la propiedad evaluada por el ensayo Marshall, mas bien refleja la estabilidad de las mezclas frente a las deformaciones plásticas, por lo cual, hoy en día, no es suficiente para evaluar el comportamiento de las mezclas frente a otro tipo de deterioros, como lo es por ejemplo, la fisuración (Molenaar et al., 2002; Pérez et al., 2006; Arabani y Ferdowsi, 2009).

En los Estados Unidos, en el año 1985, se da inicio al programa SHRP (Strategic Highway Research Program), el cual tiene como finalidad satisfacer la necesidad de racionalizar el gasto y la inversión en la construcción y mantenimiento de las autopistas. Para ello, se destinaron inicialmente 150 millones de dólares con el objetivo de desarrollar nuevas especificaciones para materiales asfálticos que relacionen directamente los ensayos de laboratorio con el



comportamiento en servicio de los firmes. Uno de los principales resultados de este programa son las especificaciones Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements), que consideran un conjunto de ensayos y especificaciones para ligantes y mezclas asfálticas. Sin embargo, los procedimientos implementados durante el programa SHRP para el diseño y control de mezclas no evalúan de forma precisa el comportamiento de las mezclas en el firme. Por ello, muchas de las agencias de transporte en los Estados Unidos que a pesar de adoptar las metodologías de diseño volumétrico de mezclas propuestas en Superpave, principalmente en los niveles 2 y 3 (utilizados para el diseño de mezclas para tráfico medios y pesados), señalan la necesidad de ensayos complementarios a la metodología Superpave que permita evaluar el comportamiento real de las mezclas en servicio (Brown et al., 2001).

En consecuencia, es preciso señalar la necesidad de implementar ensayos para el diseño y control de mezclas que permitan, en mejor forma, evaluar y analizar parámetros asociados al comportamiento de las mezclas bituminosas en servicio. Actualmente, en España el método de diseño de mezclas bituminosas presta especial atención a evaluar el control de deformaciones plásticas mediante el ensayo de pista, dejando en un segundo plano el comportamiento a la fisuración de las mezclas, siendo éste último, uno de los principales tipos de fallo de los pavimentos bituminosos.

La fisuración de los pavimentos bituminosos es una de las causas más comunes de deterioro, que trae consigo implicaciones económicas serias, junto con una pérdida de las características funcionales y estructurales que el pavimento debe poseer, puesto que cuando las fisuras progresan hacia estados más severos de deterioro, se compromete la seguridad y el confort de los usuarios de las carreteras.

Las fisuras en los pavimentos bituminosos se pueden presentar en varias formas o patrones geométricos (Fig. 1- 2). Entre los más comúnmente observados se encuentran la fisuración transversal, fisuración longitudinal, fisuración por fatiga (piel de cocodrilo) y fisuración en bloque, los cuales pueden ser producidos mediante diferentes mecanismos como la fisuración descendente, llamada también “top down cracking”, la fisuración ascendente, la fisuración por esfuerzos térmicos en la superficie y la fisuración por reflexión, esta última, producida muchas veces por los esfuerzos de tracción en la base de recrecimientos asfálticos contruidos sobre pavimentos rígidos, o bien, en recrecimientos sobre pavimentos bituminosos deteriorados con juntas o grietas en la superficie antigua (Huang, 1993; Fonseca, 1995; Jajliardo, 2003; Koh et al., 2009).

Otro aspecto a considerar, son las características viscoelastoplásticas de las mezclas bituminosas, que hacen que sea complejo analizar su comportamiento, puesto que éste depende de varios factores que provocan que este material se comporte de manera completamente

diferente. Por una parte, se encuentran las solicitaciones generadas por el tráfico, que se presentan en diferentes tipologías y velocidades de aplicación de cargas hacia el firme. Mientras que por otra parte, se encuentran las solicitaciones producidas por el medioambiente, que se manifiestan mediante variaciones térmicas, produciendo un estado tensional adicional en la estructura del firme.



Fig. 1- 2 Tipos de fisuración en pavimentos bituminosos
(Fuente: Kuai et al., 2009)

De acuerdo a lo anterior, en los últimos años, son varios los investigadores que han llevado a cabo estudios con la finalidad de conocer el comportamiento de las mezclas bituminosas frente al fenómeno de fisuración. Algunos mediante modelos analíticos y otros mediante estudios experimentales que simulen mejor el mecanismo de propagación de fisuras en las capas de mezclas bituminosas, y a su vez, que entreguen información que permita evaluar la resistencia de las mezclas ante este modo de deterioro de los firmes (Pérez et al., 2000; Shen y Kirkner, 2001; Molenaar, 2000; Barbosa et al., 2003; Erkens et al., 2003; Mamlouk y Mobasher, 2004; Wagoner et al., 2005; Arabani y Ferdowsi, 2009; entre otros).

La resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas es una de las propiedades que debe considerarse en el diseño de la mezcla asfáltica (Pérez et al, 2006). Sin embargo, los ensayos experimentales desarrollados que son capaces de evaluar esta propiedad son reducidos, algunos poco prácticos, otros presentan poca repetibilidad, o bien, presentan complejos estados tensionales que impiden una correcta propagación de las fisuras (Wagoner et al., 2005a; Tarefder y Kias, 2009).

Por lo tanto, continuando con la línea de investigación desarrollada en la Universidad Politécnica de Cataluña a partir del año 1987, centrada principalmente en el desarrollo de nuevos ensayos experimentales que proporcionan procedimientos y metodologías simples que permitan tener una mejor caracterización de los materiales empleados en carreteras, y bajo la necesidad de



crear un procedimiento que permita evaluar el comportamiento de las mezclas bituminosas frente al deterioro de fisuración, se plantea mediante el desarrollo de esta tesis doctoral, implementar un ensayo experimental “práctico” que tenga la finalidad de evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas, reflejando uno de los modos de fallo más frecuentes al que se ven expuestas las capas bituminosas del firme, y a su vez, que sea de utilidad en el diseño y control de las diferentes tipologías de mezclas que se fabrican y utilizan actualmente.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general de esta investigación es evaluar las propiedades de las mezclas bituminosas relacionadas con su comportamiento a la fisuración, y a su vez, proponer nuevos parámetros que permitan establecer criterios de diseño de mezclas, mediante el desarrollo y empleo de un nuevo ensayo a tracción directa.

El objetivo general de esta investigación se consigue a partir de los siguientes objetivos específicos:

1.2.1 Enfoques de mecanismos de fisuración y ensayos para su evaluación

Se propone realizar una exhaustiva revisión de la literatura disponible referente a los enfoques y modelos utilizados para la representación y análisis de los mecanismos de fisuración, y efectuar un análisis de los procedimientos experimentales desarrollados que actualmente se emplean para evaluar las propiedades vinculadas a la resistencia a fisuración en las mezclas bituminosas.

1.2.2 Desarrollo de un nuevo ensayo para la evaluación de la respuesta de las mezclas bituminosas frente al deterioro de fisuración

Se plantea desarrollar un nuevo ensayo experimental para evaluar el proceso de fisuración en las mezclas bituminosas, que permita representar el progreso de las fisuras en el firme de acuerdo al principal modo de fallo, el modo I, y al mismo tiempo, mejorar las desventajas presentadas por los actuales procedimientos. A su vez, se propone validar el ensayo mediante un estudio estadístico de sensibilidad y repetibilidad de las variables de estudio.

1.2.3 Evaluación de la resistencia a la fisuración de mezclas bituminosas

Se plantea evaluar la resistencia a la fisuración a partir de la respuesta de los principales parámetros mecánicos relacionados con el mecanismo de fisuración en diferentes tipologías de mezclas, utilizando distintos betunes, y en un amplio rango de temperaturas de ensayo.



1.2.4 Determinación de una correlación entre parámetros mecánicos del ensayo estático a tracción con el comportamiento a fatiga

Se plantea evaluar la respuesta a fatiga de una serie de mezclas bituminosas utilizadas comúnmente en capas de base e intermedias, mediante el ensayo de flexotracción en tres puntos, obteniendo su ley de fatiga. A su vez, se pretende analizar si existe correlación entre algunos de los parámetros obtenidos mediante el nuevo ensayo desarrollado, con los obtenidos en el ensayo dinámico de fatiga, con la finalidad de obtener una predicción del comportamiento a fatiga de las mezclas por medio de un procedimiento más sencillo.

1.2.5 Diseño de mezclas

Se propone, una vez analizados los resultados experimentales, determinar instrumentos de apoyo al diseño de mezclas que permitan obtener mezclas con un mejor comportamiento frente al deterioro por fisuración.



CAPÍTULO 2

Estado Actual del Conocimiento



2.1 INTRODUCCIÓN

El actual sistema de transporte de la mayoría de los países incluye los medios marino, aéreo y terrestre, en los cuales de una u otra forma requieren del uso de los pavimentos dentro de su funcionamiento. Las estructuras de pavimento requeridas deben permitir un servicio adecuado, pero a su vez, los países deben optimizar la inversión en su construcción y los costos de mantenimiento que requieren durante su puesta en operación, de manera de no incrementar los costos que los usuarios incurren producto del estado en que se encuentran los pavimentos. Para cada medio de transporte se requieren diferentes tipos de estructuras, que van desde firmes para aeropuertos hasta firmes para caminos y puentes, los cuales requieren de un estado tal, que garantice a sus usuarios confort y seguridad.

Fuera de los beneficios directos a los usuarios, el papel importante que juegan las redes de carreteras dentro del desarrollo económico de los países es un factor primordial a tener en cuenta. **Keane (1996)**, señala en su investigación que las inversiones en las redes de carreteras tienen un impacto directo a nivel macro y microeconómico en la productividad de una determinada región o localidad de un país. **Keane** destaca principalmente la influencia directa que tiene un sistema de transporte por carreteras de calidad sobre el empleo y desarrollo industrial de una determinada región, basándose en que las empresas pueden recibir insumos para sus instalaciones de producción, y a su vez, los productos terminados pueden acceder al mercado de manera eficiente. Es decir, un eficiente sistema de transporte permite a las empresas a reducir los costos de transporte, lo que reduce los costes de producción, aumentando la productividad y los beneficios.

Consecuentemente, **Tamames (2003)** e **Ibarrola (2008)**, destacan la inversión estatal en construcción y mantenimiento de redes de carreteras como una herramienta de crecimiento económico, generando condiciones de estabilidad en un país. Esto se produce debido a que las inversiones estatales suponen una movilización de recursos que generan una serie de impactos específicos, como el aumento de demanda de otras infraestructuras (p. ej. viviendas), generando inputs en el mercado interno por demanda de materiales como el hierro, acero, cemento y asfalto. Además, se genera un aumento en el PIB del sector de la construcción, estimulando el empleo, y la productividad del sistema económico general, junto con un aumento de las recaudaciones impositivas para el país.

En el caso de España, el panorama del sector viario presentado por la **Asociación Española de la Carretera (2009)**, señala que el crecimiento del país en los últimos diez años ha alcanzado un nivel de bienestar como nunca antes en su historia y que dicho nivel ha ido de la mano con el crecimiento del sector viario, el cual se refleja en las grandes inversiones en la red de carreteras

que se han realizado en dicho periodo en España, sobretudo en infraestructuras viarias de alta capacidad (Tabla 2- 1), disponiendo actualmente de una de las redes de comunicación por carretera más extensa de Europa, con un nivel tecnológico equiparable al de los países líderes del entorno europeo en materias de transporte.

Tabla 2- 1 Evolución de la red de carreteras del estado (Fuente: Ministerio de Fomento)

Años	Total	Red a cargo del Estado		Red a cargo de las Comunidades Autónomas		Red a cargo de Diputaciones y Cabildos	
		Vías de gran capacidad	Resto de la red	Vías de gran capacidad	Resto de la red	Vías de gran capacidad	Resto de la red
1992	158.324	5.443	15.862	1.316	70.245	229	65.229
1993	159.630	5.714	15.862	1.456	70.626	234	65.738
1994 (1)	162.196	6.002	16.534	1.489	71.076	257	66.838
1995	162.617	6.274	16.652	1.572	70.981	287	66.851
1996	162.100	6.534	16.597	1.667	70.499	299	66.504
1997	162.795	6.919	16.478	1.821	70.623	323	66.631
1998	163.273	7.423	16.419	1.664	68.910	562	68.295
1999	163.769	7.657	16.467	2.032	69.048	617	67.948
2000	163.557	7.656	16.449	2.088	68.749	699	67.916
2001	163.799	8.082	16.376	2.362	68.492	708	67.779
2002	164.139	8.368	16.273	2.245	67.214	793	69.246
2003	164.584	8.794	16.063	2.361	67.909	854	68.603
2004	165.152	9.164	15.991	2.407	68.094	873	68.623
2005	165.646	9.465	15.950	2.746	68.009	945	68.531
2006	166.339	10.081	15.723	2.812	68.183	979	68.561

Unidad: Kilómetros

(1) Red a cargo del Estado, se elabora en este año un nuevo inventario.

Lo expuesto en el párrafo anterior queda reflejado en la gran cantidad de producción de mezclas bituminosas en la industria dedicada al rubro de construcción de carreteras. Según cifras de la European Asphalt Pavement Association (EAPA), España ha liderado la producción de mezclas bituminosas en conjunto con los países más desarrollados en Europa, sobretudo en los últimos cinco años, periodo 2003-2007 (Fig. 2- 1). En este contexto, al analizar los datos presentados, España ha pasado a aumentar su producción de mezclas en un 109% en los últimos 10 años, periodo comprendido entre 1997 y 2007, pasando de producir 23,9 millones de toneladas de mezclas bituminosas a 49,9 millones de toneladas.

En la Fig. 2- 2 puede observarse la evolución de la producción de mezclas bituminosas entre los años 1994 a 2007 para Europa, Estados Unidos y a nivel mundial. Se observa en dicho periodo que Europa ha aumentado su producción en un 25%, pasando de un total de 275,7 millones de toneladas a 342,9 millones de toneladas por año. En Estados Unidos la evolución de la producción de mezclas bituminosas fue más marcada hasta el año 2002, pasando de 459 a 545 millones de toneladas entre los años 1994 y 2002, manteniéndose en los años siguientes la producción en torno a las 500 millones toneladas anuales. A nivel mundial se observa una evolución similar a la registrada en Estados Unidos, presentado el mayor incremento de



producción de mezclas en caliente entre los años 1994 y 2002, manteniéndose en los años siguientes la producción en torno a las 900 millones de toneladas anuales.

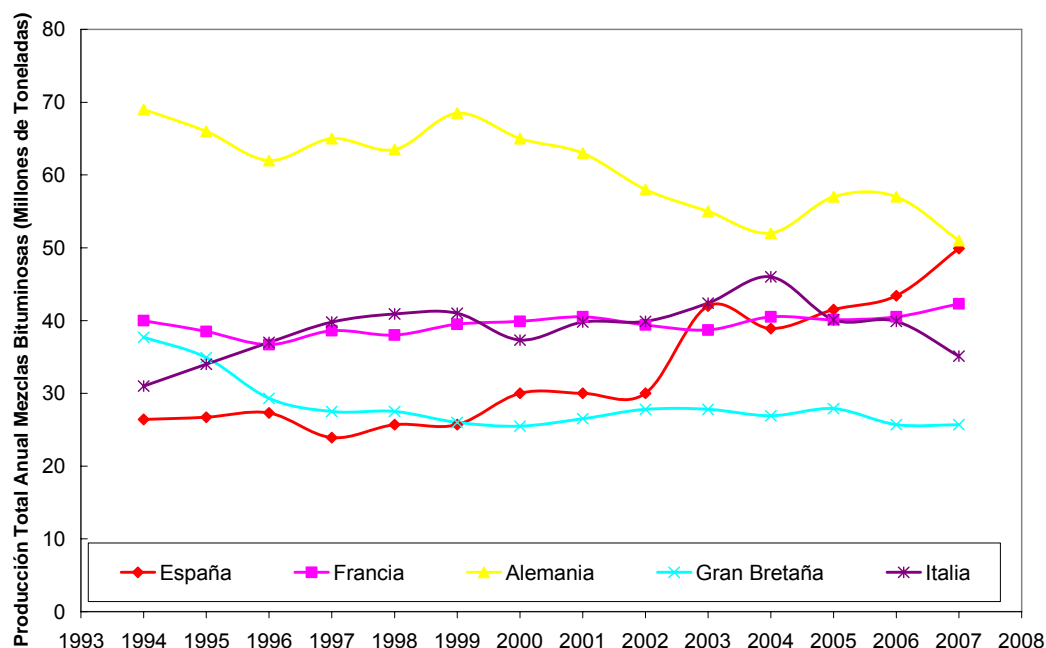


Fig. 2- 1 Producción total anual de mezclas bituminosas fabricadas en caliente en los países mayores productores de Europa
(Fuente: Asphalt in Figures, 2007)

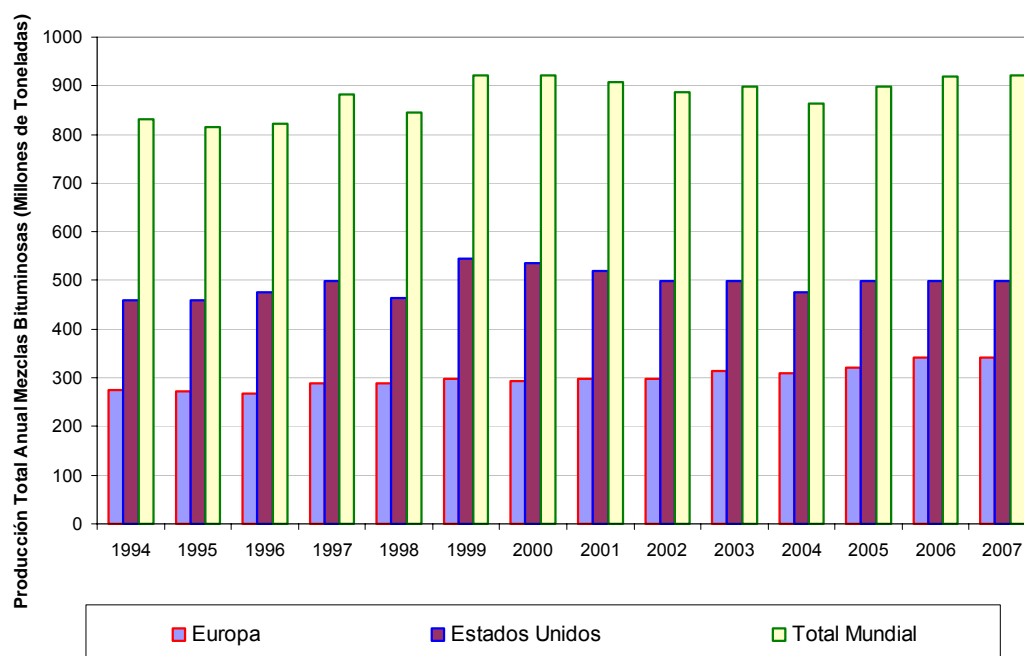


Fig. 2- 2 Producción total anual de mezclas bituminosas fabricadas en caliente
(Fuente: Asphalt in Figures, 2007)



De acuerdo al panorama presentado en este punto queda clara la importancia de tener buenas redes de carreteras dentro de los sistemas de transportes de cada país, tomando como ejemplo el crecimiento del sector viario español y su impacto en la economía del país en los últimos años. Además los niveles de producción de mezclas bituminosas de los diferentes países líderes en Europa y el panorama a nivel mundial en torno a la evolución de su producción nos permite reflexionar respecto a la magnitud de las inversiones en redes de carreteras, principalmente en las capas superiores del firme, las capas bituminosas, en las cuales se invierte la mayor cantidad de recursos financieros de los proyectos.

Por lo tanto, resulta necesario desarrollar los conocimientos científicos que permitan asegurar la durabilidad de las capas bituminosas de la estructura del firme durante los períodos usuales de diseño. En este contexto, es necesario contar con buenos procedimientos que permitan realizar una buena caracterización de las mezclas bituminosas, de manera tal, de aumentar su durabilidad frente a los mecanismos solicitantes en condiciones de servicio, optimizando así, las inversiones y los costos de mantención realizados en las carreteras.

En función de lo expuesto, surgen las siguientes incógnitas: ¿los procedimientos actuales de caracterización, diseño y control de mezclas bituminosas representan los mecanismos de deterioro producidos en éstas cuando están en servicio?, ¿estos procedimientos son de fácil aplicación? ó ¿se requieren más procedimientos de caracterización de mezclas? ¿por qué?. Las respuestas a estas incógnitas se pretenden responder a lo largo del trabajo de investigación desarrollado en esta tesis doctoral.

Antes de introducirnos en el tema de los procedimientos actuales para caracterizar las mezclas bituminosas y evaluar de su comportamiento frente a condicionantes externas, es necesario describir brevemente cual es la función de las capas bituminosas dentro del firme y a que tipo de firmes pertenecen. Es importante también, conocer los agentes solicitantes y los tipos de deterioros más frecuentes que se desarrollan cuando las mezclas bituminosas están en servicio, haciendo énfasis en los factores o mecanismos que producen estos deterioros, principalmente el de fisuración, que es el que se evaluará en este trabajo de investigación mediante el desarrollo y aplicación de un nuevo procedimiento experimental.

2.2 TIPOS DE FIRMES

Básicamente, los tipos de firmes pueden clasificarse en dos grandes grupos: flexibles y rígidos. Los firmes flexibles, que son a los que nos referiremos durante esta tesis doctoral, se caracterizan por estar formados por una serie de capas constituidas por materiales con una resistencia a la deformación que usualmente es decreciente con la profundidad, de modo similar a la disminución de las tensiones transmitidas desde la superficie (Fig. 2- 3). Los firmes flexibles

suelen estar revestidos mediante tratamientos superficiales, para bajas intensidades de tráfico, o por capas de mezclas bituminosas, generalmente utilizadas en caminos y carreteras con altos volúmenes de tráfico. Este tipo de firmes es llamado “flexible” puesto que toda la estructura de pavimento se flexa cuando es solicitada por las cargas de tráfico.

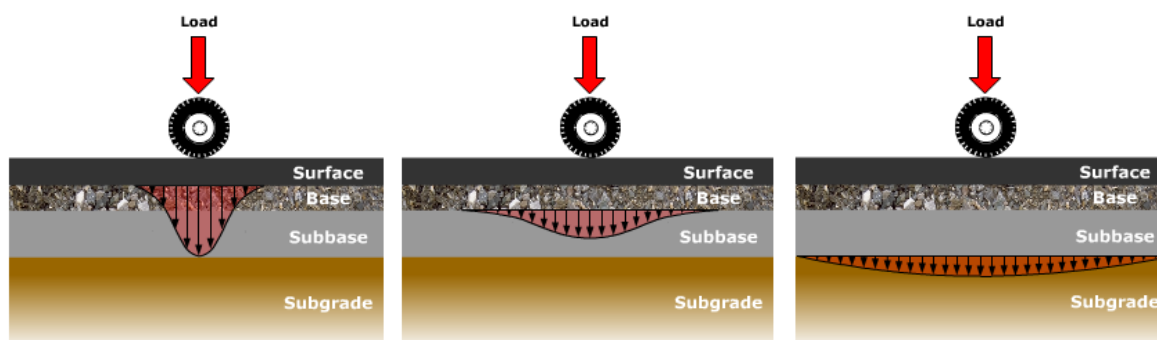


Fig. 2- 3 Tensiones producidas por el tráfico en capas de firme flexible
(Fuente: HAPI, *Asphalt Pavement Guide*)

Por otra parte, existen los firmes rígidos, que están compuestos en su superficie por una losa de hormigón. Este tipo de pavimento es llamado “rígido” debido principalmente al alto módulo de elasticidad que caracteriza al material constituyente de su superficie de rodadura, el hormigón, el cual concentra las tensiones transmitidas por las cargas solicitantes, transmitiendo tensiones menores a las capas subyacentes.

Existe además otro tipo de firme llamado semirígido, el cual considera una capa de base de alta rigidez que puede ser de hormigón, o bien, una base granular tratada con ligante hidráulico, la cual debido a sus características, es la capa que absorbe la mayor parte de los esfuerzos verticales. En su parte superior la estructura de pavimento está constituida por una o dos capas de mezclas bituminosas.

2.3 AGENTES SOLICITANTES DE LOS PAVIMENTOS

Los principales agentes solicitantes de los pavimentos son las cargas generadas por el tráfico y las condiciones ambientales a las que está expuesto el pavimento durante su vida útil.

El tráfico solicitante es un factor de primera importancia a la hora de determinar o predecir el daño en el tiempo que sufrirá un pavimento en un periodo dado. Sin embargo, la caracterización de las solicitaciones producidas por el tráfico sobre los pavimentos es bastante compleja, debido no solo a la variabilidad y periodicidad de los vehículos que lo solicitan, sino también a las interacciones vehículo-pavimento y velocidades de circulación que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas de los vehículos (Fig. 2- 4).

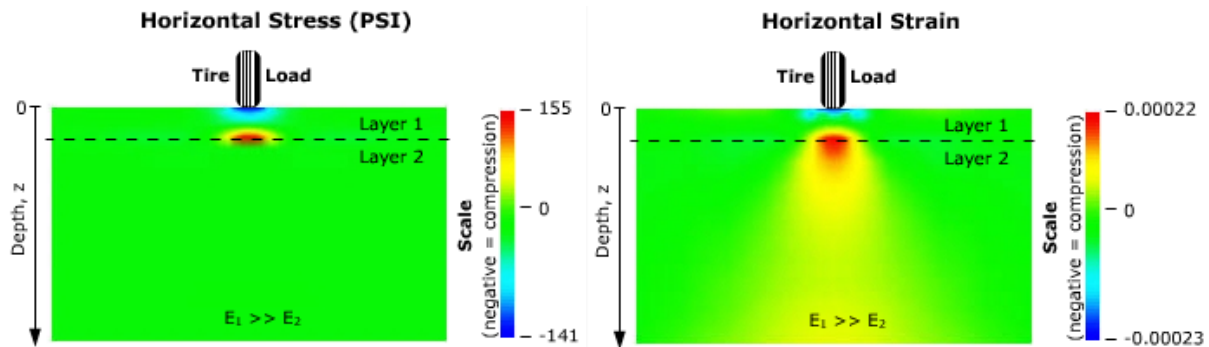


Fig. 2- 4 Esfuerzos y deformaciones generados en el pavimento por las cargas del tráfico
(Fuente: *Pavement Interactive Guide*)

Por otra parte, las solicitaciones medioambientales tienen también una gran influencia en el comportamiento mecánico del pavimento. Básicamente, dos son los efectos que afectan las características del pavimento, la temperatura y la humedad. La temperatura influye de manera directa en la rigidez del pavimento, ya que a medida que aumenta la temperatura, la capa superior del pavimento se vuelve menos rígida y cuando disminuye se incrementa la rigidez de estas capa. A su vez, la temperatura también afecta a los estados tensionales del pavimento, puesto que cuando bajan las temperaturas se generan altas tensiones superficiales de retracción en la superficie del pavimento (Fig. 2- 5).

Por otro lado, se encuentra la humedad, la cual tiene una gran influencia en la adhesividad entre los materiales componentes de las capas bituminosas, junto con ser el origen de los posibles fallos en el firme producto de la infiltración de agua en sus capas inferiores.

Existe a su vez, un efecto combinado entre la temperatura, la radiación solar, la humedad y el aire que produce una oxidación del ligante de la mezcla bituminosa a través del tiempo, que implica un aumento de rigidez de la mezcla, y por ende, un aumento de fragilidad de ésta, haciéndola mas susceptible a fallos por fisuración.

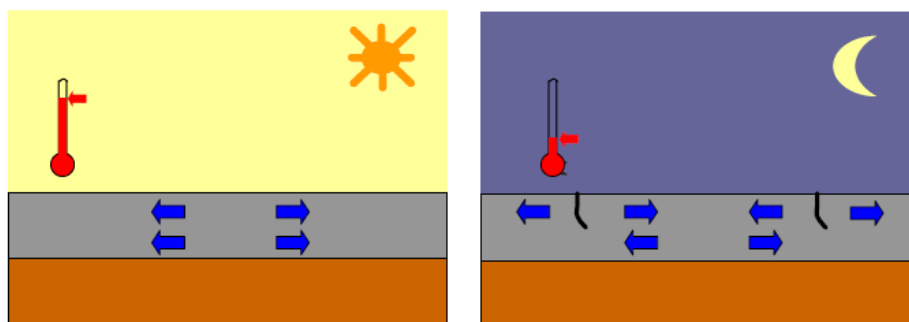


Fig. 2- 5 Tensiones generadas por variaciones térmicas
(Fuente: *Martínez, 2006*)

Ambos agentes solicitantes, tanto las cargas de tráfico como las condiciones medioambientales, junto con ser los factores que dan lugar a los principales tipos de fallos en las carreteras, en modo conjunto tienen un efecto directo sobre el nivel de serviciabilidad del pavimento en el tiempo, tal como se observa en la Fig. 2- 6.

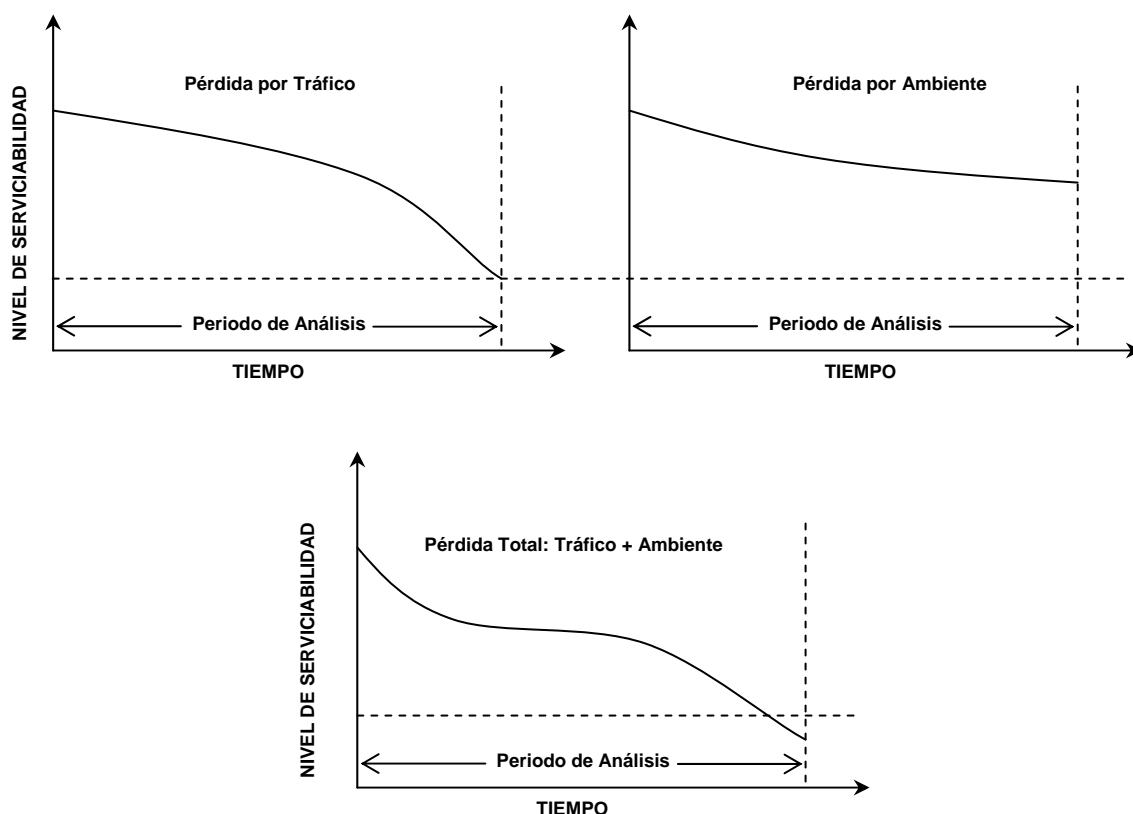


Fig. 2- 6 Efecto conjunto tráfico y medioambiente sobre la serviciabilidad de un pavimento
(Fuente: De Solminihaç, 2001)

2.4 DETERIOROS EN PAVIMENTOS BITUMINOSOS

Los agentes solicitantes que interaccionan con los pavimentos dan lugar a una serie de fallos o deterioros. El catálogo de fallos desarrollado por SHRP para su utilización en el Long-Term Pavement Performance Program (LTPP) (FHWA, 2003), reconoce los grupos de deterioros en firmes bituminosos ilustrados en la Tabla 2- 2.

Como se observa en la Tabla 2- 2 los fallos producidos por fisuración son los que se presentan en mayor cantidad de tipologías, junto con ser uno de los tipos de deterioros mas frecuentes en los pavimentos bituminosos. Por ello, y por ser el tipo de deterioro que se evaluará en esta tesis doctoral, se abordará con mayor profundidad en este punto.



Tabla 2- 2 Fallos catalogados por grupos en pavimentos bituminosos

A. Fisuración	B. Baches y Parches	C. Deformación Superficial
Fisuración por Fatiga Fisuración en Bloque Fisuración de Borde Fisuración Longitudinal Fisuración por Reflexión en Juntas Fisuración Transversal	Baches Deterioros por Parches	Ahuellamiento o Roderas Deslizamiento de la Carpeta
D. Defectos Superficiales	E. Deterioros Misceláneos	
Exudación Pulimento de Áridos Desprendimiento de Gravillas	Asentamiento de la Berma Expulsión de Finos	

Numerosos investigadores señalan que el fallo por fisuración en los pavimentos bituminosos es un fenómeno sumamente complejo, difícil de representar por medios experimentales y que está regido por una amplia gama de factores, dentro de los cuales se puede considerar las características de los materiales constituyentes, el espesor de la capa y el proceso de ejecución de la mezcla. Por otra parte, tal como se señaló en el punto anterior, existe la importante influencia de los agentes externos que solicitan el pavimento, que tienen que ver principalmente con las características de las cargas aplicadas y condiciones climáticas imperantes en el medioambiente (Brown et al., 2001; Roberts et al., 1996; McGennis et al., 1994; Alonso, 2006).

2.4.1 Fisuración por fatiga

Este tipo de fallo, también conocido como “piel de cocodrilo”, ocurre generalmente en áreas del pavimento sujeta al impacto de numerosas y repetidas cargas por tráfico, principalmente en la zona de rodada de la calzada, en la cual la mezcla bituminosa sufre un fatigamiento, o pérdida paulatina de sus propiedades estructurales, producto de las cargas reiteradas. Generalmente este tipo de fallo se caracteriza por tener un patrón geométrico descrito por numerosas grietas interconectadas entre sí, formando trozos de ángulos agudos.

La fisuración por fatiga se puede presentar en diferentes niveles de severidad. Se dice de un nivel de severidad bajo cuando las fisuras están apenas interconectadas entre sí, y no existe expulsión de finos desde las capas inferiores. El nivel de severidad moderado se presenta con un mayor número de grietas interconectadas y sin presencia de expulsión de finos desde las capas inferiores. Finalmente, el alto grado de severidad se puede observar cuando las grietas

están completamente interconectadas, presentando expulsión de finos desde las capas inferiores, y además existen trozos de pavimento desprendidos que se mueven con el paso del tráfico (Fig. 2- 7).



Fig. 2- 7 Deterioro por fatiga en diferentes niveles de severidad - (a), Bajo, (b), Moderado, (c) Alto
(Fuente: FHWA, 2003)

Dentro de los deterioros de fisuración por fatiga se pueden identificar dos mecanismos. El primero, en que la fisura progresa desde la capa de base, se conoce como fisura ascendente (bottom-up cracking), o también, fisuración “clásica” por fatiga. Este fallo se produce por tensiones y deformaciones producto de esfuerzos de tracción en la base de la capa bituminosa, que provoca que la fisura se inicie y se propague hacia la superficie.

En el segundo mecanismo, las fisuras se inician y se propagan desde la superficie del pavimento hacia la base y es conocida como fisuración por fatiga descendente (top-down fatigue cracking). Este fallo ocurre generalmente en pavimentos de mayor espesor, a causa de tensiones combinadas de tracción y corte en la superficie del pavimento bituminoso, en la interfase neumático – pavimento, producto del tráfico de vehículos pesados con neumáticos con altas presiones de inflado, sumado también el efecto del envejecimiento de la mezcla bituminosa y el efecto térmico que provoca retracciones en el pavimento cuando las temperaturas bajan.

2.4.2 Fisuración en bloque

Este tipo de fisuración se caracteriza por presentar fisuras o grietas que conforman una serie de trozos aproximadamente rectangulares, cuyas dimensiones pueden estar comprendidas entre 0,1 y 10 m².

Este tipo de fallo es causado principalmente por las tensiones generadas por diferenciales térmicos, especialmente en mezclas bituminosas con módulos de rigidez muy altos, en las cuales se provocan retracciones superficiales que dan origen a este tipo de fallo. Otras causas posibles se atribuyen a la falta de espesor o fatiga de las capas del firme, falta de capacidad portante del firme, o bien, a una mala ejecución de las capas del firme, (Fig. 2- 8).

Al igual que en la fisuración por fatiga se pueden presentar tres grados de severidad. Se considera un nivel de severidad bajo, cuando el ancho promedio de las fisuras es inferior a 6 mm, moderado, cuando el ancho promedio de las fisuras se encuentra entre 6 y 19 mm y un alto grado de severidad cuando el ancho promedio de las fisuras es mayor a 19 mm.



Fig. 2-8 Fisuración en bloque
(Fuente: *Pavement Interactive, Asphalt Pavement Guide*)

2.4.3 Fisuración de borde

Este tipo de fisuración se caracteriza por presentar grietas en forma de media luna y se encuentran ubicadas a una distancia no mayor de 0,6 m del borde de la calzada. Este fallo se produce en los bordes de las capas bituminosas del pavimento que no cuenta con arcenes pavimentados. Su causa se atribuye a una base granular débil por falta de compactación y confinamiento. Otro factor que acelera este tipo de deterioro es la posible infiltración de humedad, por drenaje insuficiente, que provoca una baja en la estabilidad de las bases de la estructura del pavimento (Fig. 2-9).



Fig. 2-9 Fisuración de borde
(Fuente: *Dirección de Vialidad-Chile, 2003*)

2.4.4 Fisuración longitudinal

Este tipo de fallo se caracteriza por la aparición de grietas predominantemente paralelas al eje del camino. Cuando la posición de la grieta se encuentra a lo largo del eje de la calzada se atribuye su causa a una mala ejecución de la junta de construcción longitudinal en el extendido de la mezcla bituminosa. Cuando la grieta aparece localizada en la zona de la huella de paso de los vehículos, su causa se atribuye a problemas en las capas inferiores, capas de base y subbase granular, o bien, a un fallo por fatiga de la mezcla. Finalmente cuando las grietas se localizan en otras posiciones su origen se le atribuye a contracciones térmicas producidas en el pavimento cuando existen descensos de temperatura (Fig. 2- 10).

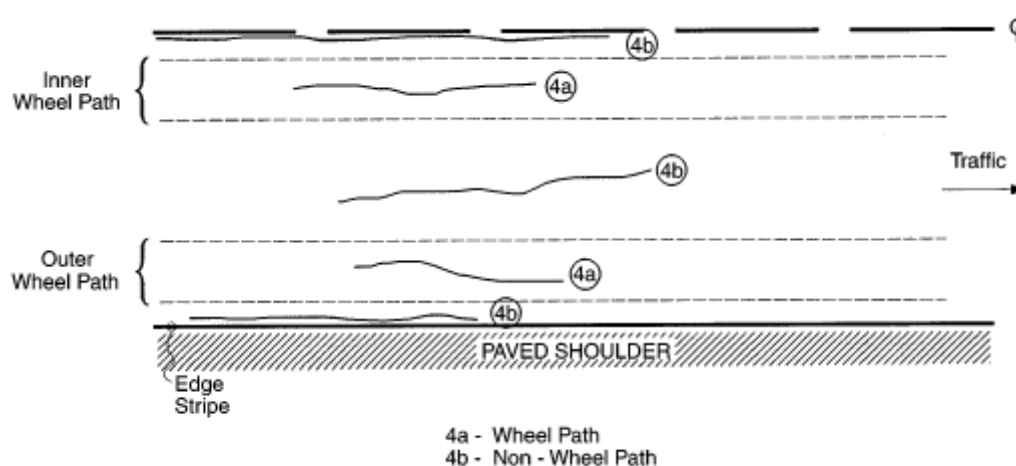


Fig. 2- 10 Tipos de fisuración longitudinal
(Fuente: FHWA, 2003)

Este tipo de fisuración se puede presentar como fisuración ascendente (bottom-up cracking), cuando la causa es principalmente por debilitamiento de las capas inferiores o es un comienzo de fallo por fatiga, o también se puede presentar como fisuración descendente (top-down cracking), cuando el fallo obedece a causas de origen término, o bien, por el paso de vehículos pesados con neumáticos con altas presiones de inflado, generando tensiones de tracción superficial (Fig. 2- 11).

Al igual que en la fisuración en bloque, en este tipo de deterioro se presentan en tres niveles de severidad en función del ancho promedio de la fisura. Se considera un nivel de severidad bajo cuando el ancho promedio de las fisuras es inferior a 6 mm. Se considera un nivel de severidad moderado cuando el ancho promedio de las fisuras se encuentra en el rango de 6 a 19 mm, y se considera un alto grado de severidad cuando el ancho promedio de las fisuras es mayor a 19 mm.



Fig. 2- 11 Fisuración longitudinal descendente - top down cracking
(Fuente: Harmelink and Aschenbrener, 2003)

2.4.5 Fisuración por reflexión de juntas

Este tipo de fisuración se caracteriza por la aparición de grietas que se producen en las capas bituminosas que refuerzan un pavimento de hormigón, coincidiendo con las juntas y grietas de éste. Estas fisuras progresan a medida que trabajan o se mueven las juntas del pavimento de hormigón ubicado en la capa inferior, reflejándose así la fisura en la superficie. También este tipo de fallo se produce en recapados bituminosos sobre antiguas estructuras de pavimentos bituminosos con fisuras existentes, las cuales se reflejan en la nueva capa de mezcla hacia la superficie (Fig. 2- 12).

Al igual que en la fisuración en bloque y la fisuración longitudinal, en este tipo de deterioro se presentan en tres niveles de severidad en función del ancho promedio de la fisura. Cuando el ancho promedio de las fisuras es inferior a 6 mm se considera un nivel de severidad bajo. Cuando el ancho promedio de las fisuras se encuentra en el rango de 6 a 19 mm se considera un nivel de severidad moderado y se considera un alto nivel de severidad cuando el ancho promedio de las fisuras es mayor a 19 mm.



Fig. 2- 12 Fisuración por reflexión de juntas
(Fuente: *Pavement Interactive, Asphalt Pavement Guide*)

2.4.6 Fisuración transversal

Este tipo de fallo se caracteriza por presentar fisuras aproximadamente normales al eje del camino y se producen sin existir un pavimento de hormigón subyacente. La principal causa atribuida a este tipo de deterioro es el efecto térmico en pavimentos flexibles con mezclas bituminosas de alta rigidez, en el cual se generan tensiones de tracción en la superficie del pavimento cuando las temperaturas bajan. Otra causa probable es la reflexión de las fisuras existentes en las capas bituminosas inferiores del pavimento, producto de una mala ejecución en su junta de construcción transversal, o bien, por reflexión de las fisuras en capas de base tratadas con cemento.



Fig. 2- 13 Fisuración Transversal
(Fuente: *FHWA, 2003*)

2.5 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS VINCULADAS CON LA RESISTENCIA AL FALLO POR FISURACIÓN

Las mezclas bituminosas tienen muchas propiedades que influyen en una adecuada resistencia a la fisuración, y es necesario analizarlas para comprender de mejor forma este modo de deterioro en los pavimentos.

2.5.1 Módulo de Rigidez

Es la propiedad definida como la relación entre el esfuerzo y la deformación. En el caso de las mezclas bituminosas, el módulo de rigidez está en función de la temperatura, tiempo y tipo de carga, debido principalmente a las características viscoelastoplásticas y susceptibilidad térmica, propias de este material. Por otro lado, la rigidez de la mezcla también es afectada por la rigidez del ligante utilizado, granulometría, contenido de huecos y contenido de betún. Además en las mezclas con el paso del tiempo se produce un fenómeno de oxidación del ligante, lo que conlleva a un envejecimiento, es decir, un aumento de la rigidez en el material produciendo que la mezcla se vuelva más frágil y menos resistente a la fisuración.

Nesnas y Nunn (2004) estudiaron el efecto del envejecimiento de una mezcla bituminosa y la relación con su módulo de rigidez, señalando que este envejecimiento se acentúa en los 40 mm superiores de la capa bituminosa, aumentando el valor de su módulo hasta en casi 4 veces su valor inicial. Por otra parte, estos investigadores señalan que las tensiones de origen térmico en la base de las capas bituminosas evaluadas son prácticamente insignificantes. Sin embargo, en la superficie de las capas bituminosas, las tensiones de origen térmico se incrementan a medida que se incrementa el módulo de rigidez (producto del envejecimiento), obteniendo mayores ratios de tensiones térmicas (tensión superficial capa / tensión base capa) y haciéndolas más susceptibles a tener fallos por fisuración descendente (top-down cracking), tal cual se observa en la Fig. 2- 14.

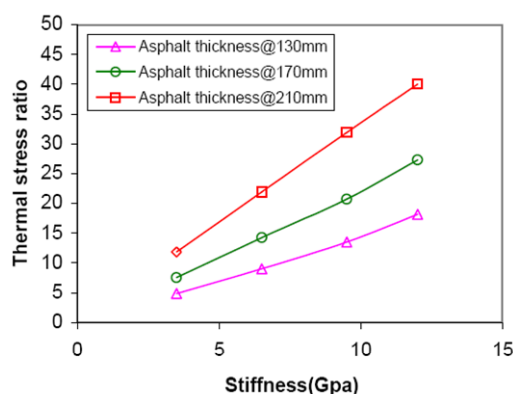


Fig. 2- 14 Efecto del módulo de rigidez y el envejecimiento en el ratio de tensiones térmicas entre superficie y base de una capa asfáltica, según su espesor (Fuente: Nesnas y Nunn, 2004)

2.5.2 Contenido de Huecos

El contenido de huecos, que está en función de la granulometría y del grado de compactación de la mezcla, también está en directa relación con la velocidad de oxidación de la mezcla, puesto que a mayor contenido de huecos, el agua y el aire oxidan el ligante de la mezcla acelerando la tasa de envejecimiento de ésta, incrementando su fragilidad, y por ende, resultando una menor resistencia a la fisuración de la mezcla bituminosa (Koh et al., 2009; Jajliardo, 2003). Por otra parte, Li et al. (2008) y Velásquez et al. (2008), señalan que a menor contenido de huecos existe una mayor resistencia para el fallo de fisuración producido por gradientes térmicos. En el caso del estudio realizado por Li et al. (2008), los resultados mostraron una tendencia que las mezclas con menor contenido de huecos obtenían en promedio mayores energías de fractura en el proceso de fisuración a bajas temperaturas. Estos resultados se obtuvieron por medio de dos diferentes procedimientos de ensayos, tal cual se observa en la Fig. 2- 15.

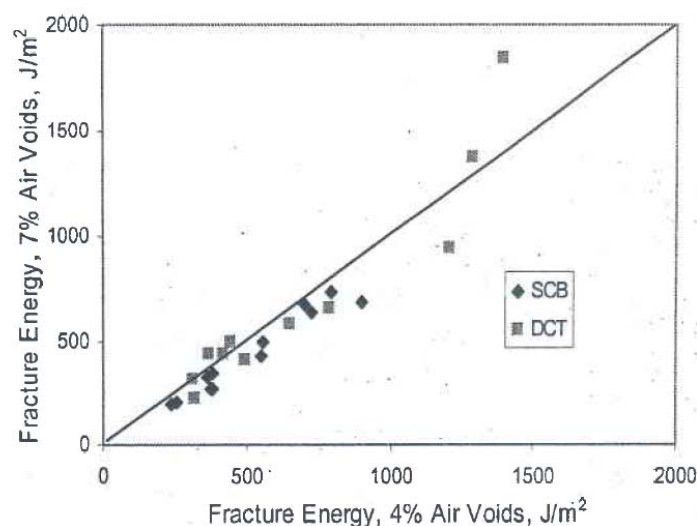


Fig. 2- 15 Efecto del contenido de huecos en la energía de fractura en mezclas bituminosas
(Fuente: Li et al., 2008)

Por otra parte, Monismith (1985) y Harvey y Tsai (1996) encontraron que la vida a fatiga de una mezcla bituminosa disminuía a medida que el contenido de huecos aumentaba en la mezcla. En el caso del estudio efectuado por Harvey y Tsai (1996) los resultados de los ensayos de fatiga realizados mostraron una mayor vida a fatiga a medida que disminuía el contenido de huecos y aumentaba el contenido de betún en la mezcla, y para el caso del módulo de rigidez inicial, para bajos contenidos de huecos se obtenían mayores módulos, tal cual se muestra en la Fig. 2- 16.

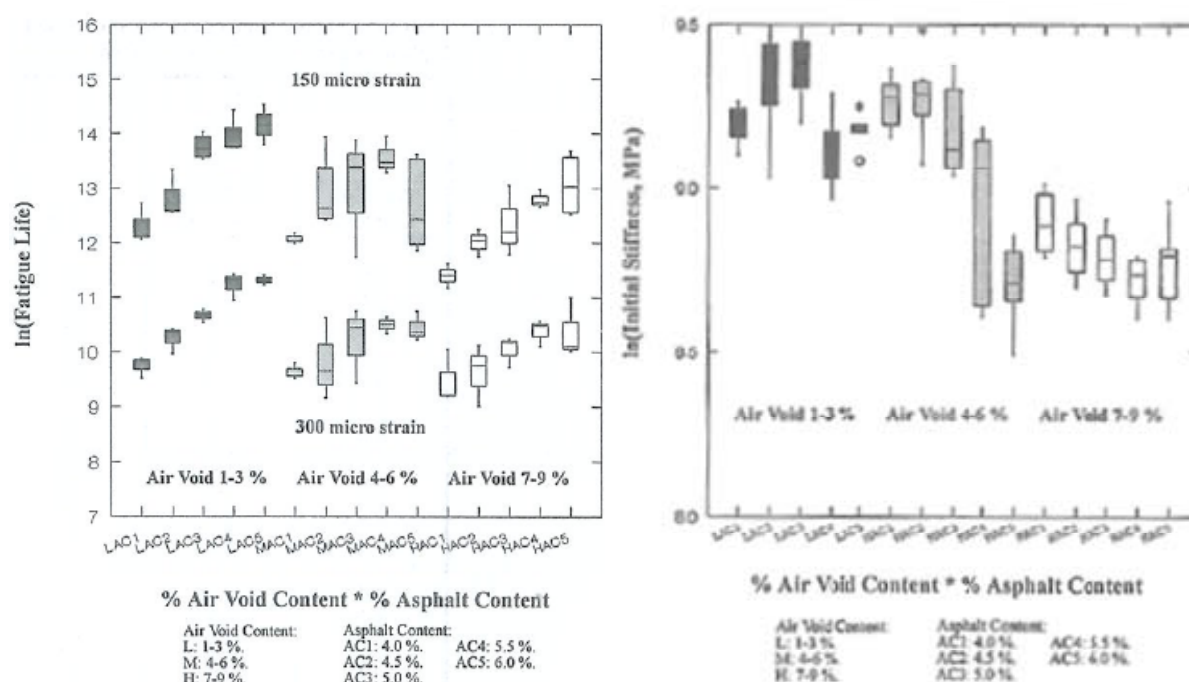


Fig. 2- 16 Efecto del contenido de huecos y contenido betún en la vida a fatiga y en el módulo de rigidez inicial de mezclas bituminosas
(Fuente: Harvey y Tsai, 1996)

2.5.3 Vacíos de agregado mineral (VMA)

El VMA, es definido como el volumen intragranular entre las partículas de los áridos en una mezcla bituminosa compactada, que comprende el contenido de huecos y el betún no absorbido dentro del agregado. Este parámetro está en función del grado de compactación, granulometría, forma de los agregados y contenido de huecos. Jajliardo (2003) indica que este factor es de suma importancia en la durabilidad de las mezclas bituminosas, puesto que al aumentar su valor se incrementa la resistencia de la mezcla al fallo por fisuración. Sin embargo, después de un cierto nivel, el alto contenido de ligante puede provocar fenómenos de inestabilidad en la mezcla.

2.5.4 Contenido de betún y espesor de recubrimiento

El contenido de betún en la mezcla es un factor muy importante a considerar para obtener mezclas más resistentes a la fisuración. En el estudio realizado por Harvey y Tsai (1996) se muestra la influencia del contenido de betún en la mezcla en el comportamiento por fatiga y su influencia en el módulo de rigidez inicial (Fig. 2- 16).

A su vez, el espesor teórico de recubrimiento, está en función del contenido específico de betún y de las características superficiales del agregado. Recubrimientos muy finos contribuyen a un envejecimiento prematuro de la mezcla lo que lleva consigo un incremento en la fragilidad de ésta. Por ello, según señalan Kandhal y Chakraborty (1996), para mezclas con un contenido de

huecos entre 4 y 5%, los agregados deberían tener un espesor óptimo de recubrimiento entre 9 y 10 micrones.

Por otra parte, Sengoz y Agar (2006), estudiaron el efecto del espesor de recubrimiento del betún en el agregado en la susceptibilidad de la mezcla bituminosa a la humedad y llegaron a resultados similares a los obtenidos por Kandhal y Chakraborty, señalando que el espesor de recubrimiento óptimo fluctúa entre 9,5 y 10,5 micrones. En la Fig. 2- 17, se muestran las curvas de evolución de la resistencia a tracción indirecta a 25 °C, tanto para probetas de control como para probetas ensayadas luego de haber permanecido un periodo sumergidas en agua. En esta figura se observa que para espesores de recubrimiento bajo el rango de 9,5 a 10,5 micrones, las diferencias entre resistencias a tracción indirecta en seco y en húmedo comienzan a ser mayores a medida que se disminuyen los espesores de recubrimiento.

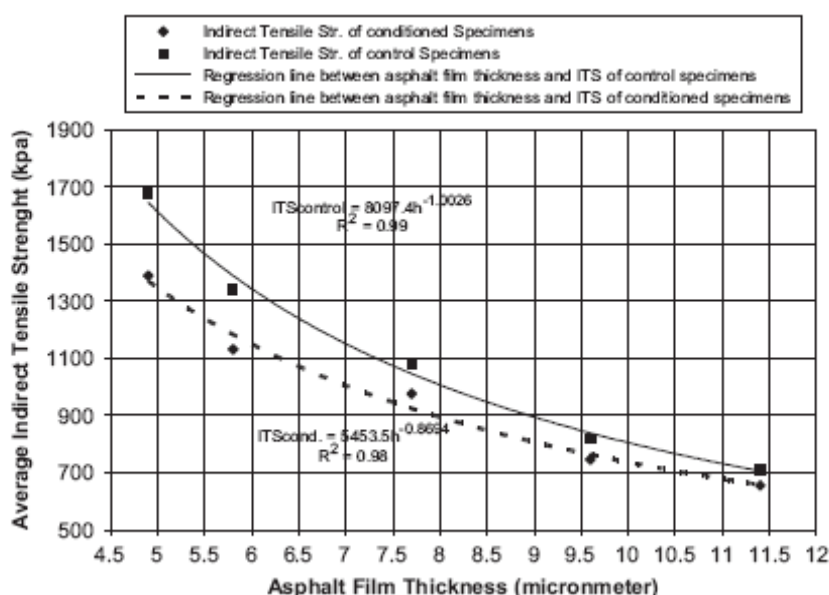


Fig. 2- 17 Efecto del espesor de recubrimiento del betún en las mezclas bituminosas
(Fuente: Sengoz y Agar, 2006)

2.5.5 Consistencia y viscosidad del betún

Las propiedades de consistencia y viscosidad son unas de las características más típicas de los ligantes bituminosos y que más definen su comportamiento en la mezcla. Según señalan Pérez y Bardesi (2006) la consistencia del ligante a temperatura ambiente (25 °C) y las temperaturas en que se producen sus cambios más significativos, gelificación e inconsistencia, son los parámetros que se han utilizado tradicionalmente para caracterizar los ligantes y que nos entregan los indicios de su comportamiento en la mezcla, puesto que a bajas temperaturas, producto de la rigidez del betún, la mezcla se comportará como un sólido frágil, siendo ésta más susceptible al fallo por fisuración, mientras que a temperaturas más altas, la mezcla tendrá un comportamiento



mas dúctil y menos resistente. A su vez, **Pérez y Bardesi (2006)** señalan que la calidad de la envuelta de los áridos en el proceso de fabricación de la mezcla está directamente relacionada con la viscosidad del betún, obteniéndose una mejor envuelta con los betunes de menor viscosidad.

Por otra parte, **Jajliardo (2003)** señala que la viscosidad del betún en la mezcla es influenciada por el envejecimiento del ligante a través del tiempo. Este factor influye directamente en la formación de fisuras, puesto que la mezcla envejecida producto de la oxidación del ligante (aumento de viscosidad) se torna más frágil.

Un estudio realizado por **Malan et al. (1989)** señala que la viscosidad del ligante utilizado en la fabricación de la mezcla tiene una gran influencia en la formación de fisuras en las mezclas utilizadas como capa de rodadura. Los resultados obtenidos de las secciones evaluadas en el periodo de estudio señalan que la respuesta del pavimento hacia el fallo por fisuración está condicionada por los volúmenes de tráfico que solicitan el pavimento, señalando a su vez, que en los pavimentos que son solicitados con tráfico liviano es mejor utilizar ligantes de baja penetración (alta viscosidad), mientras que para pavimentos que son solicitados con tráfico pesado es mejor utilizar ligantes de mayor penetración (baja viscosidad). Según **Malan et al. (1989)**, esta respuesta se debe a que la mezcla bituminosa que se encuentra bajo un tráfico de vehículos tiene un amasado continuo por la acción de las cargas de las ruedas, que no solo retarda el envejecimiento de la mezcla por la atracción de los componentes mas livianos del ligante a la superficie, sino que también, previene el desarrollo de excesivos gradientes de viscosidad en la mezcla, permitiendo el autocurado de las microfisuras generadas. Además, se señala que los tramos experimentales en que se utilizaron ligantes de baja penetración y estuvieron en condiciones de servicio con bajos volúmenes de tráfico, mostraron ventajas en la prevención o reducción de las fisuras superficiales y una menor susceptibilidad al envejecimiento.

En relación al comportamiento a fisuración por fatiga de la mezcla, el **Asphalt Institute (2007)** indica que el uso de ligantes de baja viscosidad incrementa la vida a fatiga de las mezcla proveyéndolas de una mayor flexibilidad. Sin embargo, para evitar posibles fallos por deformaciones plásticas se debe realizar una adecuada elección del ligante en función del tipo de clima imperante en la zona donde se extenderá la mezcla, señalando que en zonas de bajas temperaturas se suelen utilizar ligantes menos viscosos, que evitan problemas de fisuración producto de las bajas temperaturas extremas, mientras que en zonas de altas temperaturas se suelen utilizar ligantes mas viscosos. A su vez, la utilización de ligantes modificados permite un comportamiento de la mezcla mas uniforme a las temperaturas de servicio.



2.5.6 Granulometría y tipo del árido.

El efecto de la granulometría y tipo del árido tienen un papel importante en la respuesta de la mezcla bituminosa frente a los fallos producidos por las sollicitaciones de tráfico y medioambientales. Existe una influencia directa de la granulometría y tipo del árido en el esqueleto mineral de la mezcla bituminosa, que por una parte soporta las tensiones producto de las cargas de los vehículos, y por otra, condicionan la respuesta que es capaz de tener la mezcla frente a las tensiones inducidas producto de los gradientes térmicos.

Malan et al. (1989) señalan que la granulometría de las mezclas tiene una implicancia directa en la reducción de fisuras en la superficie de las capas de rodadura, señalando que a medida que la granulometría es mas continua existe una menor superficie específica de los áridos envueltos en ligante en contacto con los agentes atmosféricos que deterioran la mezcla, retardando así, el envejecimiento de ésta, y por lo tanto, la formación de fisuras superficiales producto de la fragilidad de la mezcla.

Según señala Koh et al. (2009), la granulometría de la mezcla afecta directamente su comportamiento frente al deterioro de fisuración descendente, señalando que las mezclas más porosas son mas afectadas por la exposición medioambiental, debido a una mayor superficie de los materiales expuesta a los rayos UV, dada principalmente por su mayor contenido de huecos. Esto implica una tasa de envejecimiento mucho mayor de las mezclas porosas en relación con las mezclas densas, lo que las hace fragilizarse con mayor rapidez, siendo más sensibles a la fisuración.

Myers et al. (1998) establecen que el efecto de la granulometría y otros factores que pueden influir en la resistencia de las mezclas bituminosas frente al fallo por fisuración puede medirse por medio del parámetro llamado energía de fractura. En este contexto, son varios los investigadores que han enfocado sus estudios en este parámetro en las mezclas bituminosas. Li et al. (2008) y Braham et al. (2007) estudiaron el efecto del tipo de árido en la energía de fractura de mezclas bituminosas a bajas temperaturas. Ambos estudios señalaron que los áridos graníticos presentaron un mejor comportamiento en relación a los áridos calizos, puesto que los resultados registrados mostraron valores más altos de energía de fractura en las mezclas estudiadas, tal cual se observa en la Fig. 2- 18.

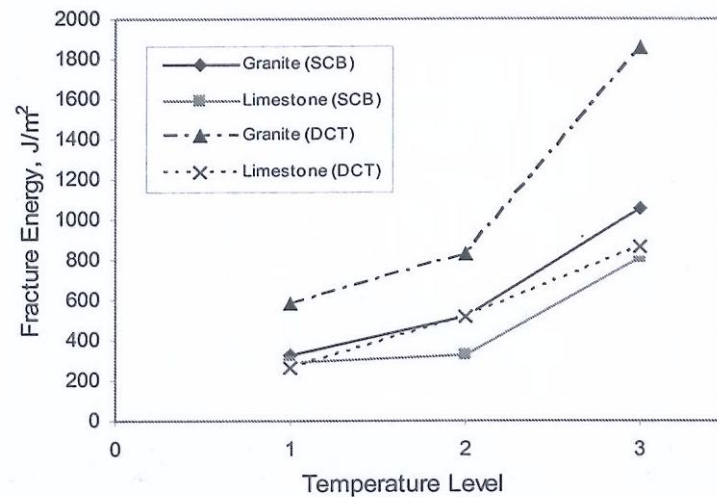


Fig. 2- 18 Efecto del tipo de árido en la energía de fractura a bajas temperaturas en mezclas bituminosas
(Fuente: Li et al., 2008)

Por otra parte, en el estudio realizado por Li et al. (2008) se señala que la diferencia de las energías de fractura a bajas temperaturas entre los áridos graníticos y los calizos puede observarse mediante una inspección visual en la superficies fracturadas de las probetas ensayadas, las cuales muestran claramente la mayor resistencia a fisuración a bajas temperaturas de los áridos graníticos, tal cual se observa en la Fig. 2- 19. En la imagen de la derecha se observa como la fisura se propaga en la interfase entre el mástico y el árido, debido a mayor resistencia de los áridos graníticos, mientras que en la imagen de la izquierda se observa que las mezclas fabricadas con áridos calizos, la fisura se propaga partiendo los áridos, producto de su menor resistencia a la propagación de las fisuras.

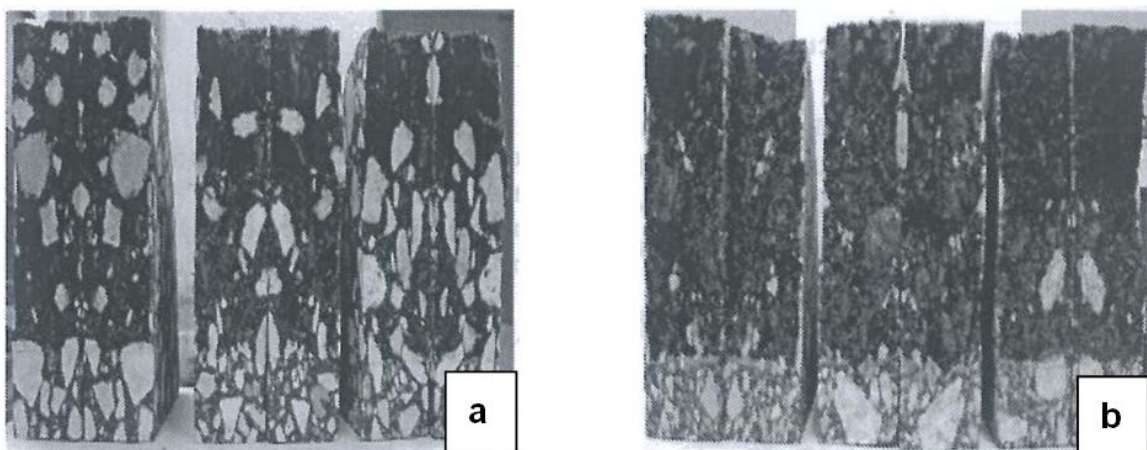


Fig. 2- 19 Efecto del tipo de árido en la superficie de fractura a bajas temperaturas en mezclas bituminosas, (a) áridos calizos y (b) áridos graníticos
(Fuente: Li et al., 2008)

Un estudio realizado por Miró et al. (2005) en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña evaluó la influencia de la concentración y tipo de filler, en el envejecimiento de la mezcla. En este estudio se evaluaron dos tipos distintos de filleres, carbonato cálcico y cal hidratada. Además en el estudio se estableció un procedimiento para determinar la concentración volumétrica óptima de filler en la mezcla mediante la medición de la energía específica de fractura. Los resultados obtenidos por Miró et al. (2005) establecieron que para minimizar el efecto del envejecimiento de la mezcla, el contenido de filler debería ser de un 20% a un 30% inferior al contenido óptimo recomendado en condiciones de no envejecimiento, mejorando de esta forma el comportamiento en servicio de la mezcla ante el fallo por fisuración (Fig. 2- 20).

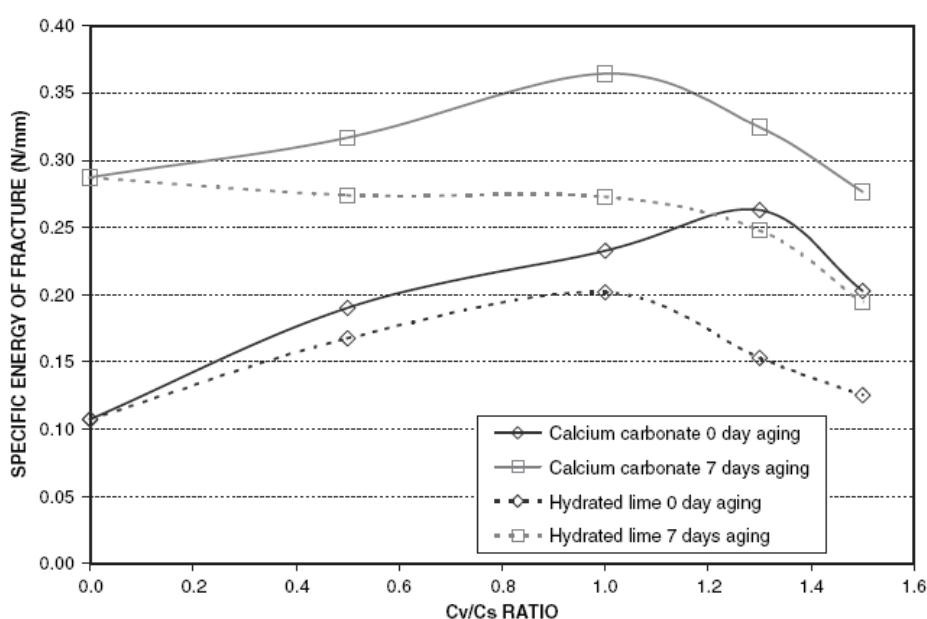


Fig. 2- 20 Variación de la energía específica de fractura con la concentración volumétrica de filler para 0 y 7 días de envejecimiento
(Fuente: Miró et al., 2005)

En relación al fallo de fisuración por fatiga Jajliardo (2003) señala que las opiniones del efecto de la incidencia de la granulometría de los áridos en la fisuración por fatiga están divididas. Por una parte Jajliardo (2003) señala que investigadores establecen que no existe ningún efecto de la granulometría del árido, y a su vez, cita otros estudios, que señalan que las mezclas de granulometría continua son menos susceptibles a la fisuración por fatiga, puesto que éstas tienden a tener mayores espesores de recubrimiento en el árido lo cual ayuda a disipar las tensiones producidas.

Otros estudios revisados en la literatura señalan un efecto directo del tipo de árido y su granulometría en la resistencia a fisuración por fatiga. El estudio efectuado por Kim et al. (1992)

señala que el tipo de árido tiene un efecto importante en la resistencia a fatiga y en la deformación permanente de las mezclas bituminosas, indicando un mejor comportamiento en mezclas fabricadas con áridos más rugosos y con mayor angulosidad en su forma, tal como se ilustra en la Fig. 2- 21, donde se observa un mayor número de repeticiones para un mismo nivel de deformación en la ley de fatiga para la mezcla fabricada con áridos con caras mas rugosas y mayor angulosidad (RB), respecto de la mezcla fabricada con áridos de caras más pulidas y menor angulosidad (RL).

Por otra parte, Kandhal y Parker (1998) señalan que la granulometría de los áridos tiene un efecto significativo sobre la rigidez de las mezclas y por ende en la vida a fatiga de éstas, concordando también con lo expuesto por Kim et al. (1992) respecto a la influencia de la textura y angulosidad de los agregados en la vida a fatiga de las mezclas bituminosas.

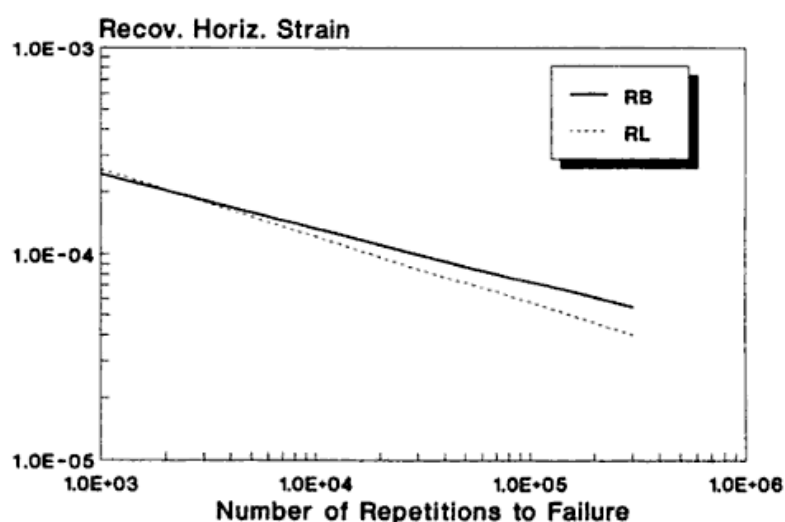


Fig. 2- 21 Efecto del tipo de árido en la resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas
(Fuente: Kim et al., 1992)

2.6 MODOS DE PROPAGACIÓN DE FISURAS

En este punto se presentan los principales modos o mecanismos que hacen que se inicien y progresen los fallos de fisuración en los pavimentos bituminosos. A su vez, se presentan diversos enfoques del estudio de este tipo de deterioro.

Es importante señalar que se reconocen tres etapas en la formación y progresión de las fisuras. La primera etapa es llamada *iniciación*, donde se producen los primeros cambios microestructurales producto de las solicitaciones a las que está sometido el material dando lugar a la formación de microfisuras, Fig. 2- 22(a). Luego sigue la etapa de *propagación*, donde se generan las macrofisuras producto de la unión de las microfisuras existentes. Esta unión de

microfisuras se debe a que se generan mecanismos de trabazón en la matriz de áridos, Fig. 2-22(b), los cuales junto con las discontinuidades propias del material, como son las dislocaciones existentes, los poros y huecos presentes, se producen puentes de fisuración aumentando la longitud de la fisura, Fig. 2- 22 (c - f), hasta terminar finalmente con la *fractura* o fallo total del material, que es cuando se han separado íntegramente las dos caras de material solicitado (Martínez, 2006; López, 2007).

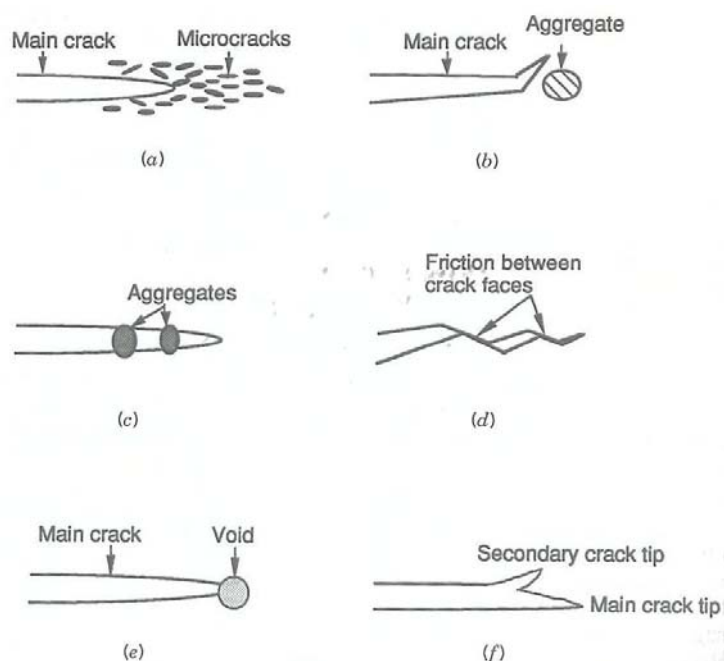


Fig. 2- 22 Mecanismos desarrollados durante el proceso de fisuración
(Fuente: Shah et al., 1995)

Según el tipo de sollicitación imperante en el medio, las fisuras una vez que se inician se propagan en un material siguiendo determinados modos específicos. Una forma de clasificación de las formas de propagación de fisuras en un material, fue la introducida por Irwin en 1957, que permite estudiar la concentración de tensiones en la cabeza de una fisura y mostrar sus modos de propagación, definiendo 3 modos: Modo I o modo de apertura (tracción normal), en el cual las caras de la fisura se separan casi paralelamente entre sí, Modo II o modo de deslizamiento (corte normal), en el cual las caras de la fisura se deslizan una sobre la otra y Modo III o modo de deslizamiento lateral (corte paralelo), en el cual las caras de una fisura se deslizan lateralmente una respecto a la otra (Oller, 2001; Fakhri et al., 2009). Estos modos de propagación de fisuras se pueden observar en la Fig. 2- 23.

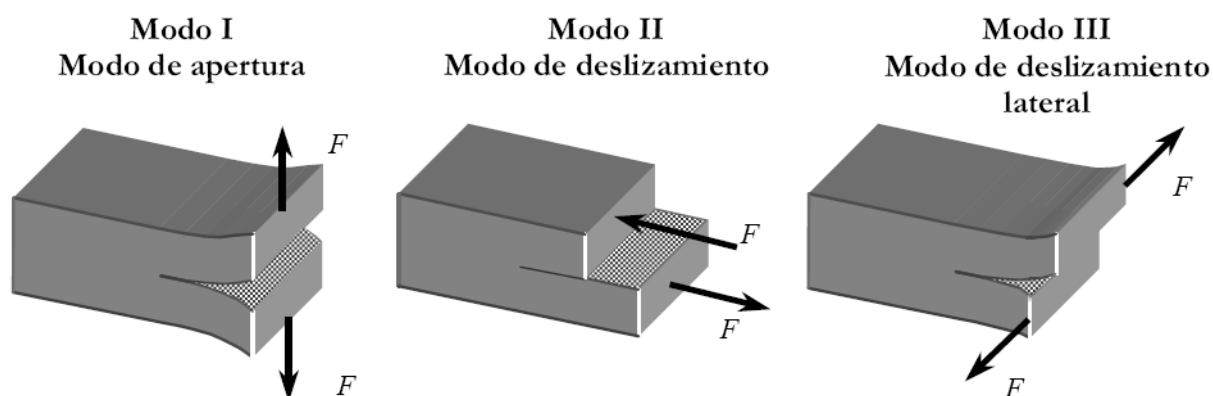


Fig. 2- 23 Tres modos fundamentales de propagación de fisuras
(Fuente: Oller, 2001)

De los modos de fisuración antes descritos, el modo I es observado generalmente cuando la rueda cargada de un vehículo pasa sobre una fisura transversal o longitudinal de un pavimento. Además se observa cuando se producen esfuerzos térmicos en la superficie de la capa de rodadura, o bien, cuando se producen movimientos de contracción térmica en capas rígidas ubicadas bajo una capa de mezcla bituminosa. El segundo modo de fisuración es observado cuando la rueda cargada se acerca a una fisura transversal o cuando se desplaza longitudinalmente al borde de una fisura longitudinal, y el modo III aparece en fisuras longitudinales cuando la rueda cargada pasa cerca del final de la fisura (Pais y Pereira, 2000).

De acuerdo con Pais y Pereira (2000), las cargas causadas por el tráfico producen una actividad horizontal y vertical entre los bordes de una fisura, modos I y II de fisuración, produciendo la propagación de esta. Por otra parte, los gradientes térmicos causan una actividad horizontal entre los bordes de la fisura, modo I de fisuración.

Shen y Kirkner (2001), señalan que existen varios tipos de fisuración generados por condiciones térmicas, generalmente ocurridos en zonas con temperaturas extremas muy bajas, las que producen esfuerzos de tracción en la superficie de la capa de rodadura, donde las fisuras se inician y se propagan básicamente por el modo I de fisuración. De manera conjunta, Shen y Kirkner (2001) señalan que estos efectos térmicos por bajas de temperaturas producen esfuerzos de retracción en las capas de base produciendo microfisuras en la parte inferior de las capas de mezcla bituminosa que luego por efecto del tráfico se propagan hacia la superficie.

Según señalan Nesnas y Nunn (2004) el fallo por fisuración en los pavimentos bituminosos ocurre cuando las tensiones por tracción y sus respectivas deformaciones inducidas por el tráfico y/o por los cambios de temperatura en el ambiente, exceden una propiedad particular de cada mezcla, llamada por ellos, como esfuerzo de rotura o *breaking strength*. Nesnas y Nunn (2004)



establecen que a temperaturas elevadas existe una mayor relajación de esfuerzos en el pavimento lo que permite disipar las tensiones, sin alcanzar el esfuerzo de rotura, debido principalmente al comportamiento visco-elástico presentado en las mezclas bituminosas. Sin embargo, cuando las temperaturas disminuyen, debido al comportamiento más elástico del material prevalecen las condiciones de tensión en el pavimento, siendo éste más propenso a sufrir fallos por fisuración. Según lo señalado, a altas temperaturas el componente viscoso de la mezcla bituminosa es más dominante, lo cual permite la relajación de tensiones en poco tiempo, mientras que a bajas temperaturas, el proceso de relajación de tensiones puede llevar mayor tiempo.

Otros investigadores como Roque et al. (2002), Koh et al. (2009) y Fonseca (1995), señalan que hoy en día aún no existe un completo entendimiento, ni un acuerdo único, respecto a los factores o mecanismos que generan y reflejan las fisuras en las mezclas bituminosas. Sin embargo, en las investigaciones realizadas existe un consenso en el cual se contempla que los esfuerzos generados por los gradientes térmicos son los que inciden en el inicio de las fisuras y los esfuerzos generados por el tráfico son los que toman parte en un segundo paso en el cual se propagan las fisuras. Además se señala que existen ciertas condiciones físicas que potencian el inicio y propagación de las fisuras, dentro de las que se encuentran las diferencias de rigideces entre la sección estructural de un firme y la estructura de un puente, ensanches en la sección transversal de un camino, diferencias de asentamientos del suelo, microfisuras generadas por un deficiente procedimiento constructivo, entre muchas otras.

De la revisión de la literatura expuesta en este punto, se puede concluir que en pocas ocasiones se dan los tres modos de propagación de fisuras descritos en forma aislada, generalmente los casos de propagación resultan de una combinación de estos tres modos básicos. Sin embargo, si se observa que el modo predominante de propagación de fisuras en los pavimentos bituminosos, tanto para los casos de la fisuración ascendente (bottom-up cracking), como para los casos de fisuración descendente (top-down cracking) es el modo I, influenciado por los movimientos horizontales entre los dos bordes de una fisura en las capas inferiores del firme, junto con los esfuerzos de tracción generados producto de los ciclos térmicos y por las sollicitaciones de los neumáticos de los vehículos pesados con altas presiones de inflado.

2.7 ENFOQUES DE MECANISMOS DE FISURACIÓN EN MEZCLAS BITUMINOSAS

Para obtener una mejor comprensión de los mecanismos de fisuración en las mezclas bituminosas y entender el proceso de iniciación y progresión de las fisuras hasta su fallo, es necesario analizar los diferentes enfoques y criterios de fallos que están relacionados con este



tipo de deterioro. Para lo cual, en este punto se describen y analizan los enfoques de los mecanismos de fisuración desde el punto de vista de la respuesta mecánica de la mezcla bituminosa frente a una aplicación de carga a velocidad constante y monotónica; enfoque que llamaremos *tenacidad* de la mezcla, y desde el punto de vista de la respuesta mecánica de la mezcla frente a la repetición de cargas cíclicas muy inferiores a las de resistencia máxima; enfoque que llamaremos *fatiga* de la mezcla.

2.7.1 Tenacidad

Un método para explicar el fenómeno de fisuración en las mezclas bituminosas es mediante la fractura mecánica de los materiales. La ciencia de la mecánica de fractura fue introducida en sus primeros pasos por Inglis en 1913, quien introdujo el concepto de concentración de tensiones enmarcado en la teoría clásica de la elasticidad. Mas tarde, Griffith en 1920, fue quien mejoró la formulación propuesta por Inglis, introduciendo verificaciones experimentales y estudiando el concepto de estabilidad de la fisura y su propagación. Sin embargo, a partir de los estudios desarrollados por Irwin en 1948, quien estudió el comportamiento en la vecindad de la cabeza de la fisura, junto con Orowan en 1955, quien estudió los criterios y tipos de fractura, fue cuando se inició la ciencia de la fractura mecánica de los materiales, tal como se conoce hoy en día, introduciendo los conceptos de factor de intensidad de tensiones, fragilidad y tenacidad (Oller, 2001).

Bajo este enfoque se estudiará el proceso por el cual la mezcla bituminosa sufre deformaciones en estado de tracción uniaxial bajo cargas cuasi estáticas y monotónicas, llegando a su fallo como consecuencia del desarrollo e interconexión entre micro-fisuras. También hay que aclarar que las cargas cíclicas también son causales de fractura, aún con amplitudes muy bajas, desarrollando tensiones muy por debajo de los límites reconocidos como los de fractura pero este fenómeno, también conocido como fatiga, se analizará más adelante en esta tesis doctoral.

Es importante para analizar este enfoque aclarar los conceptos de fragilidad y ductilidad. Cuando existe un fallo, rotura o fractura frágil, se entiende que existe una propagación de una fisura debido a una deformación muy pequeña en el que el material no alcanza a desarrollar mecanismos plásticos, y la fisura se propaga rápidamente. Sin embargo, para el caso de fallo, rotura o fractura dúctil, el comportamiento y crecimiento de la fisura está bajo la influencia de la plasticidad, retardando la velocidad de propagación de la fisura. A su vez, existe una mezcla de ambos comportamientos que está presente en materiales cuasi-frágiles, combinando efectos de fragilidad y plasticidad.

Lo descrito anteriormente se puede observar en la Fig. 2- 24. En ésta se aprecia que para materiales frágiles con un comportamiento elástico lineal, la zona de proceso de fractura es

pequeña. Para los materiales dúctiles la zona de fractura es pequeña y está rodeada de una zona no lineal producto del desarrollo de mecanismos plásticos y finalmente se observa que para los materiales cuasi frágiles la zona de fractura es grande y está rodeada de una zona plástica.

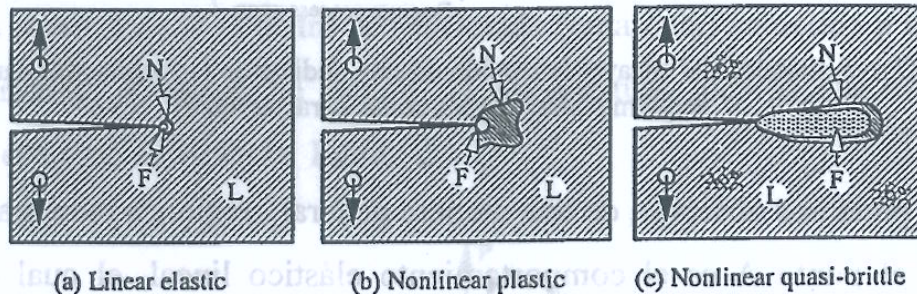


Fig. 2- 24 Esquema de una fisura en un material (a) Frágil (b) Dúctil (c) Cuasi frágil
(Fuente: Karihaloo, 1995)

En los inicios de la mecánica clásica de fractura, se instauró por Inglis el concepto de *concentración de tensiones*, el cual establece la presencia de irregularidades en forma de discontinuidades en la matriz del material, provocando un incremento de tensiones, en los bordes de dicha discontinuidad. Mas tarde, Irwin propuso el concepto del *factor de intensidad de tensiones*, el cual permitió hacer un análisis mecánico en la vecindad de la cabeza de la fisura. Este último factor señalado se define normalmente en función del mecanismo que se desarrolla en la generación de la fisura, de acuerdo a los tres modos revisados en el punto anterior, modo I, modo II o modo III.

Para el modo I de fractura, Fig. 2- 25, que es el que interesa en el desarrollo de este trabajo, el factor de intensidad de tensiones depende principalmente de los esfuerzos de tracción, la longitud de la fisura y de las características geométricas del entorno, y puede escribirse como se expresa en la ecuación (2. 1).

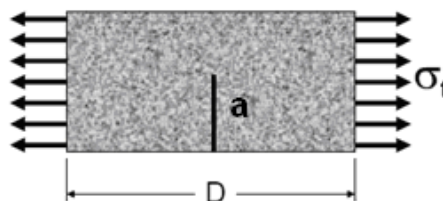


Fig. 2- 25 Geometría modo I de fractura

$$K_I = f(a, D) \sigma_t \sqrt{\pi a} \quad (2.1)$$

Donde,

- K_I : Factor de intensidad de tensiones
 $f(a, D)$: Constante en función de la geometría
 σ_t : Tensiones de tracción
 a : Longitud de la fisura

De acuerdo a lo postulado por **Oller (2001)**, bajo el enfoque de la mecánica clásica de fractura, existe un límite superior o umbral del factor de intensidad de tensiones denominado *factor de intensidad crítico de tensiones*, K_{IC} , y éste se alcanza cuando la tensión en la cabeza de la fisura llega al nivel de resistencia a fractura, σ_f , y es en ese momento cuando la fisura comienza a propagarse.

En los últimos años ha sido motivo de investigación la aplicación de la mecánica de fractura a los materiales, específicamente los llamados cuasi frágiles, que se caracterizan por presentar comportamientos elastoplásticos, como por ejemplo el acero, materiales cerámicos y el hormigón. Con esto también se han establecido otras definiciones para el término de “tenacidad” del material, como el señalado por **Karihaloo (1995)**, quien define el término “tenacidad” como la capacidad de los materiales de absorber energía durante la deformación, es decir, la capacidad de seguir soportando esfuerzos a deformaciones superiores a la del esfuerzo máximo sin que se produzca la rotura.

Shah et al., 1995 realiza la clara diferencia del fenómeno de fisuración o fractura de materiales cuasi frágiles, respecto la fractura elástica lineal de los materiales frágiles, señalando que para el caso de materiales idealmente frágiles, el comportamiento frente a cargas es lineal hasta que llega a un punto en el cual se produce la fractura de manera inmediata **Fig. 2- 26a**. Sin embargo, para el caso de los materiales cuasi frágiles existe un comportamiento no lineal posterior a la carga máxima, tal cual se observa en la **Fig. 2- 26b**.

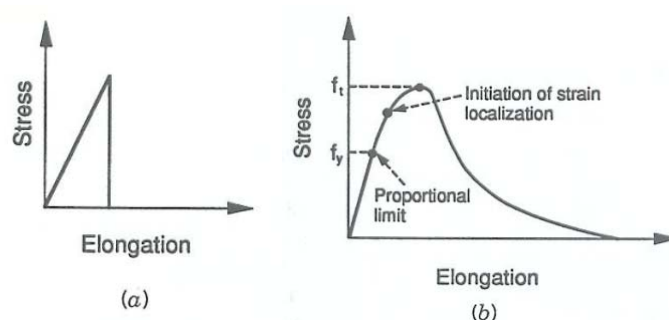


Fig. 2- 26 Curvas tensión desplazamiento en materiales frágiles (a) y cuasi frágiles (b)
(Fuente: **Shah et al., 1995**)

La curva carga - desplazamiento resultante característica de un ensayo experimental que garantice el modo I de fallo para materiales cuasi frágiles es la que se muestra en la Fig. 2- 27. En ella se puede observar de manera general el comportamiento del material. Del origen al punto A, el material presenta un comportamiento lineal, el cual corresponde a un estado inicial, en el cual se puede despreciar la formación de nuevas fisuras. Del punto A al punto B, por encima de la zona lineal, comienza el material a tener un comportamiento no lineal, existiendo una degradación de las propiedades mecánicas del material y es donde empieza a desarrollar microfisuras y una vez alcanzado el pico comienza la zona de softening o relajación (entre puntos B y D), donde se observa una primera zona, entre puntos B y C, en la cual se forman las macrofisuras para llegar a la zona de cola, entre puntos C y D, donde se desarrollan los mecanismos de trabazón que existe entre los áridos y los puentes de fisuración, inestabilizándose el proceso de propagación de la fisura hasta la fractura total. A su vez, la Fig. 2- 27 muestra que la zona comprendida entre el punto B y D se denomina zona de proceso de fractura.

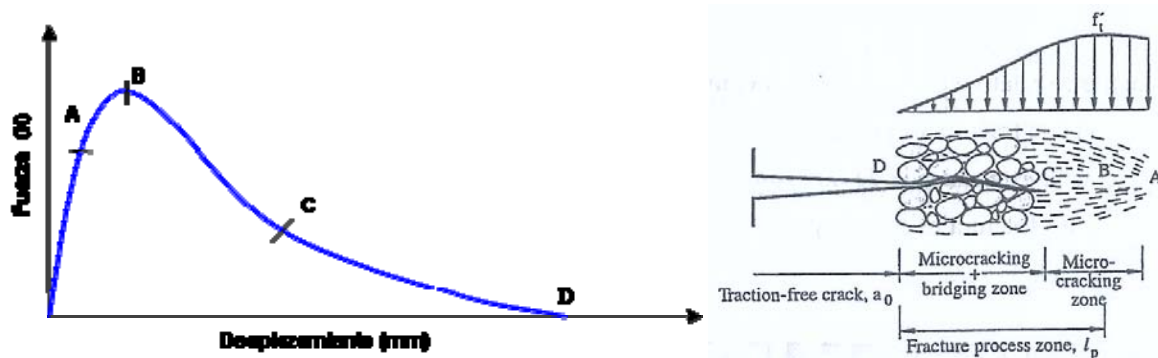


Fig. 2- 27 Curva fuerza – desplazamiento resultante en ensayos de tracción en materiales cuasi frágiles y zonas características en el proceso de fractura de materiales cuasi frágiles, modo I de fractura
(Fuente: Karihaloo, 1995)

2.7.1.1 Concepto de energía disipada en el proceso de fractura

Uno de los aportes de la mecánica clásica de fractura es el concepto de *energía de fractura*, el cual se entiende como un parámetro propio del material y fundamental para analizar el comportamiento de un sólido durante el proceso de fractura o fisuración.

En la curva carga desplazamiento, ilustrada en la Fig. 2- 28, se observa un estado de equilibrio cuando no existen esfuerzos aplicados al material. Sin embargo, una vez que se aplica una carga cuasi estática y monotonica, la tensión incrementa hasta llegar a un límite superior conocido como resistencia máxima teórica a tracción del material, σ_{th} , y seguidamente la carga comienza a decrecer hasta llegar a cero. En este contexto, durante la aplicación de la fuerza se

realiza un trabajo, W_f , que se almacena en forma de *energía de deformación* hasta la separación de las partes, momento en el cual esa energía de deformación se transforma en *energía de fractura*, relajándose cada una de las partes de las tensiones soportadas.

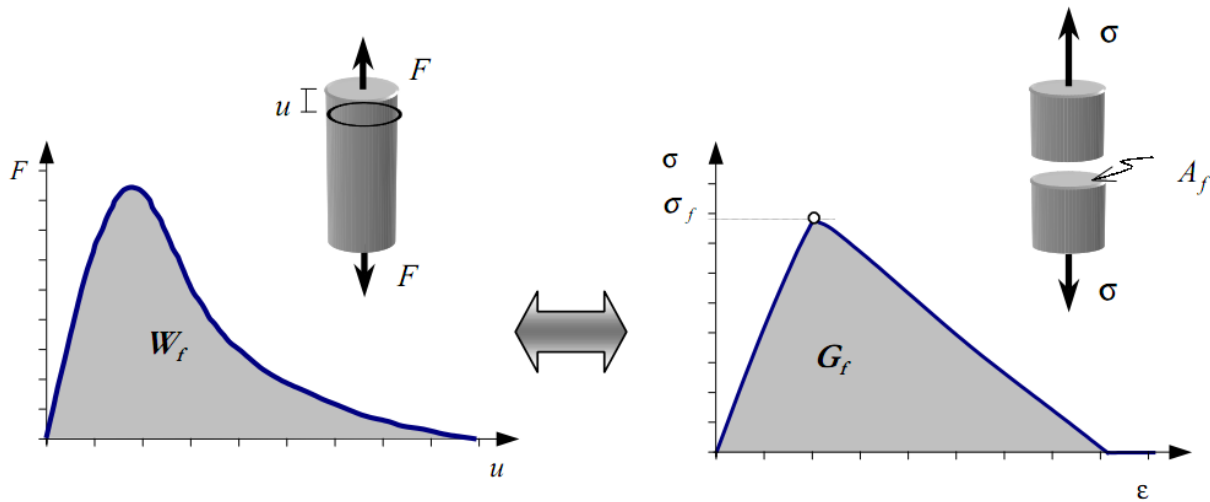


Fig. 2- 28 Forma esquemática de la obtención de la energía de fractura
(Fuente: Oller, 2001)

La *energía de fractura*, G_f , o también llamada energía total disipada durante el proceso de fractura, G_D , proviene de dos fenómenos bien diferenciados, señalados en la ecuación (2. 2), uno que se manifiesta por el desarrollo de mecanismos plásticos, expresado por la disipación plástica por unidad de área γ^p , y otro de la fractura propiamente dicha, cuya disipación está representada por γ^0 , y que se gasta en separar dos planos atómicos, Fig. 2- 29 (Oller, 2001).

$$G_f = G_D = \gamma^p + \gamma^0 \quad (2. 2)$$

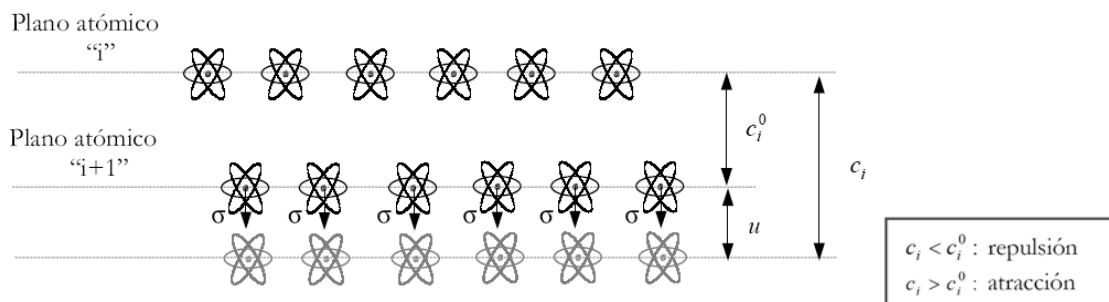


Fig. 2- 29 Esquema del movimiento entre planos atómicos
(Fuente: Oller, 2001)



Las metodologías desarrolladas para la obtención de la energía disipada en el proceso de fractura de las mezclas bituminosas se basan principalmente en el desarrollo de ensayos experimentales que representen el principal modo de falla de éstas frente al fenómeno de la fisuración, el modo I. En estos procedimientos se puede determinar independientemente la energía de fractura y la resistencia o tensión máxima de fisuración. De estos ensayos se puede calcular la energía disipada en el proceso de fisuración mediante la gráfica de la curva de carga – desplazamiento resultante, como la ilustrada en la Fig. 2- 28, sobre la que se obtiene el trabajo total de fractura, W_f , calculado como el área bajo la curva señalada, de acuerdo a la ecuación (2. 3). Posteriormente al dividir este trabajo realizado por el área de ligamento o fractura de la muestra, se obtiene el valor de la energía de fractura o energía total disipada durante el proceso de fractura, G_f , según se señala en la ecuación (2. 4).

$$W_f = \int_0^{\Delta R} F du \quad (2. 3)$$

$$G_f = G_D = \frac{W_f}{A_f} \quad (2. 4)$$

Donde,

W_f : Trabajo de fractura

F : Carga

u : Desplazamiento

G_f , G_D : Energía de fractura o energía total disipada

A_f : Área de fractura

ΔR : Deformación de rotura

2.7.1.2 Ensayos para determinar energía de fractura en mezclas bituminosas

En el campo de las mezclas bituminosas, se han desarrollado varias metodologías experimentales que permiten representar y obtener una mejor comprensión de los mecanismos de iniciación y propagación de fisuras en pavimentos bituminosos, y se basan en representar específicamente el comportamiento a fractura de estos materiales. Sin embargo, es ahora, en los últimos años, con el desarrollo de la ciencia de la mecánica de fractura de los materiales cuasi-frágiles se ha podido describir adecuadamente los mecanismos de fractura en las mezclas bituminosas.

En este contexto, los ensayos a tracción son bastante utilizados en el campo de la ingeniería, especialmente el campo de la mecánica de fractura, debido a que estos permiten determinar



propiedades mecánicas de los materiales relacionadas con su resistencia y capacidad de deformación. A su vez, permiten determinar parámetros como deformación de rotura, módulo de rigidez, carga máxima o energía disipada en el proceso de fisuración; los cuales están directamente vinculados a la resistencia a la fisuración de las mezclas.

En el último tiempo han sido varios los investigadores que han estudiado los conceptos derivados de la mecánica de fractura aplicados en las mezclas bituminosas, entre los que se encuentran los estudios realizados por Wagoner en la Universidad de Illinois, por Molenaar en la Universidad de Delf y por Koh en la Universidad de Florida. La finalidad de estos estudios ha sido investigar sobre las propiedades mecánicas de fractura de mezclas bituminosas mediante el desarrollo de unos nuevos ensayos que permiten obtener parámetros mecánicos que entreguen información para una mejor caracterización de las respuestas de las mezclas bituminosas frente al proceso de fisuración bajo diferentes condiciones, ya sean climáticas, de materiales, de tipo y contenido de ligante, entre otras variables.

De manera simultánea, el equipo de investigación de la Universidad Politécnica de Cataluña liderado por el catedrático Pérez-Jiménez ha desarrollado nuevos procedimientos experimentales con el objetivo de evaluar y establecer nuevos parámetros que representen las propiedades mecánicas relacionadas con la resistencia a la fisuración en las mezclas bituminosas.

- **Single - edge notched beam, SE(B).**

El ensayo Single-edge notched beam (viga entallada a flexotracción), ilustrado en la Fig. 2- 30, se ha utilizado en varios estudios para determinar las propiedades de fractura de las mezclas bituminosas (Mamlouk y Mobasher, 2004; Wagoner et al., 2005a; Portillo y Cobon, 2008). Su metodología consiste en la aplicación de una carga centrada en la cara opuesta de cara fisurada de una probeta prismática, y así evaluar la respuesta de la mezcla bituminosa en función de la temperatura de ensayo y velocidad de aplicación de carga. El análisis de los datos experimentales permite evaluar el comportamiento a fisuración de las mezclas bituminosas determinando parámetros de la mezcla como la energía de fractura, G_f .

La geometría del ensayo SE(B) proporciona una adecuada propagación de la fisura de acuerdo al modo I de fractura. Sin embargo, su geometría tiene la desventaja de al no ser una probeta estandarizada, se limita su aplicabilidad a vigas compactadas en laboratorio. Otra desventaja de este ensayo, es que se limita su aplicación a testigos, debido al tamaño de las probetas.

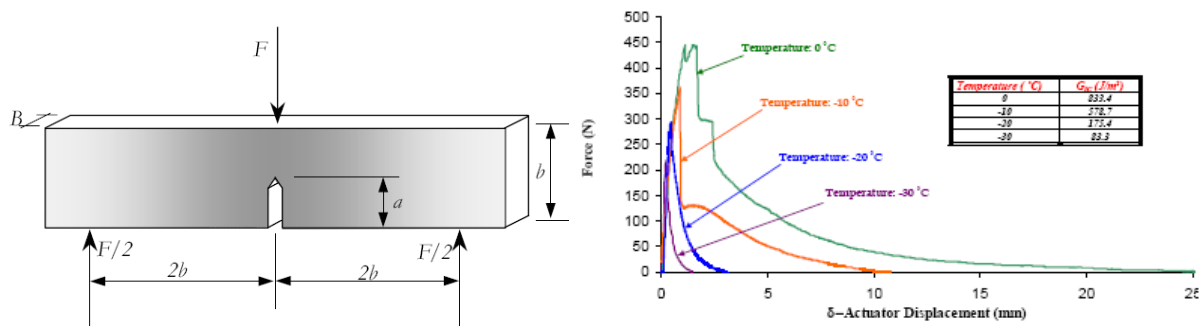


Fig. 2- 30 Esquema y curvas carga – desplazamiento resultantes del ensayo SE(B)
(Fuente: Oller, 2001; Portillo y Cobon, 2008)

- **Disk-shaped compact tension test, DC(T)**

El ensayo Disk-shaped compact tension test (disco compacto a tracción), ilustrado en la Fig. 2- 31, desarrollado por Wagoner en la Universidad de Illinois, se basa en la utilización de una probeta de geometría circular para determinar la energía de fractura en las mezclas bituminosas. Para la selección de la geometría cilíndrica utilizada en el ensayo DC(T), se tomó como punto de partida la norma ASTM E399, la cual describe la geometría utilizada para obtener el plano de fractura en probetas metálicas. Finalmente se seleccionó la geometría que se muestra en la Fig. 2- 31 con la finalidad de maximizar la longitud de la sección de fisuración y previniendo la rotura de la probeta por medio de los agujeros de carga.

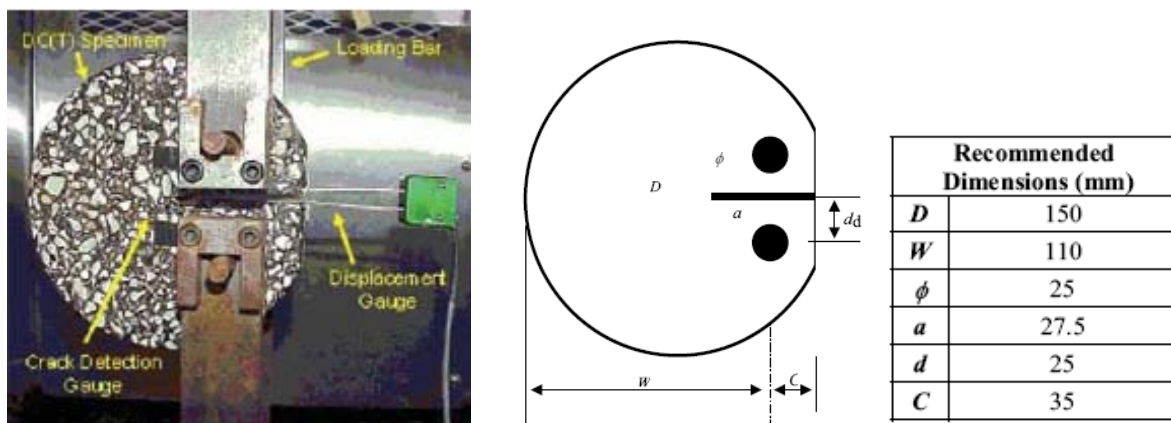


Fig. 2- 31 Montaje ensayo DC(T) y geometría recomendada
(Fuente: Kim et al., 2009; Wagoner et al., 2005b)

De acuerdo a lo señalado por Wagoner (2005b), las ventajas que presenta este ensayo es el tamaño del área de fractura y su aplicación a testigos. Sin embargo, en el proceso de fabricación de las probetas se tiene el inconveniente de que la creación de los agujeros es un proceso dificultoso y que requiere de una máquina especialmente diseñada para este procedimiento. Otro inconveniente en la ejecución del ensayo es la posible desviación de la fisura en algunos casos.

Un punto a considerar es que la forma de aplicación de carga a través de los agujeros realizados complica la ejecución del ensayo a temperaturas más elevadas.

El ensayo DC(T), actualmente se encuentra estandarizado a través de la norma ASTM D 7313-07 Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry, fijando en su procedimiento una velocidad de desplazamiento de 0.017 mm/s y señalando que la temperatura de ejecución debe ser inferior a los 10 °C.

- **Semi-circular bending test, SCB**

Otro ensayo desarrollado para medir propiedades de fractura en las mezclas bituminosas es el ensayo de flexión aplicado a una viga semicircular, SCB, ilustrado en la Fig. 2- 32, el cual ha sido aplicado en numerosas investigaciones. Este ensayo desarrollado en la Universidad de Delf tiene la ventaja que es de fácil aplicación y que de un testigo se puede obtener dos muestras, reduciendo con esto las muestras a fabricar o los testigos a extraer para realizar el ensayo.

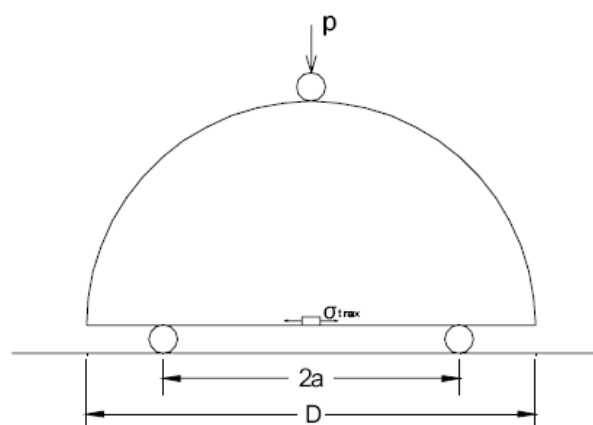


Fig. 2- 32 Montaje y esquema del ensayo SCB
(Fuente: Huang et al., 2004)

Las probetas utilizadas en el ensayo SCB son obtenidas por medio de la máquina de compactación giratoria. Posteriormente se realizan cortes de acuerdo al espesor requerido y se seccionan por la mitad obteniendo dos probetas. A cada probeta se le induce una fisura en la mitad de su diámetro, tal cual se ilustra en el esquema de la Fig. 2- 32.

El procedimiento del ensayo SCB es similar al del ensayo Single-edge notched beam, en el cual la probeta es simétricamente soportada por dos cilindros en la parte inferior y luego se aplica la carga en el centro de la parte superior, con una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min. En el ensayo se registra la carga y la deflexión (desplazamiento del pistón). Los resultados de

energía de fractura se calculan mediante el trabajo disipado en el proceso de fractura obtenido de la curva carga – desplazamiento resultante.

Una de las desventajas del ensayo SCB señaladas por Wagoner et al. (2005a) es que se produce un complejo estado tensional que afecta al proceso de propagación de la fisura, debido a los altos esfuerzos de compresión producidos producto del lugar de aplicación de la carga generando un efecto de arco con altos esfuerzos de compresión en la localidad cercana a la fisura, Fig. 2- 33.

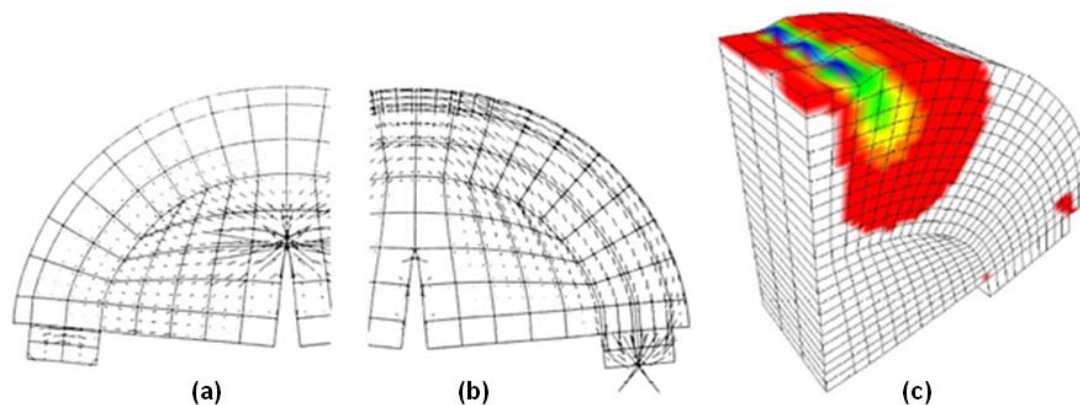


Fig. 2- 33 Campo tensional ensayo SCB modelado mediante comportamiento elástico lineal.
(a) Tensiones de tracción - (b) Tensiones de compresión - (c) Daño por tensiones de compresión
(Fuente: Molenaar et al., 2002)

Otra desventaja que presenta este procedimiento para el equipo de investigación del Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, que es lo que ha llevado al desarrollo del ensayo Fénix, objeto de esta tesis doctoral, es que la rotura de la probeta de mezcla bituminosa se lleva a cabo de forma brusca, que no permite evaluar el comportamiento de propagación de la fisura en la zona de softening, tras la carga máxima en la curva carga - desplazamiento. Esto sucede puesto que se produce una pérdida brusca de carga, salvo en mezclas muy flexibles y evaluadas a altas temperaturas.

Un parámetro para evaluar la resistencia a la fractura mediante la utilización del ensayo de flexión realizado a probetas semicirculares (SCB) es J-integral, J_c , el cual se define como la tasa de energía liberada de deformación crítica (critical strain energy release rate). De acuerdo con Mull et al. (2002), J_c es el parámetro más apropiado para caracterizar la resistencia de un material a la propagación de un fisura, donde para altos valores de J_c mayor es la resistencia a la fractura del material. La ecuación (2. 5) establece los parámetros requeridos para el cálculo de J_c (KJ/m^2), donde U es la energía de deformación para el fallo del material, obtenida como el área de la curva carga deformación hasta la carga máxima, b es el espesor de la probeta, y a_1 y a_2 son las longitudes de las fisuras generadas en la probeta, Fig. 2- 34.

$$J_c = \left(\frac{U_1}{b_1} - \frac{U_2}{b_2} \right) \frac{1}{a_2 - a_1} \quad (2.5)$$

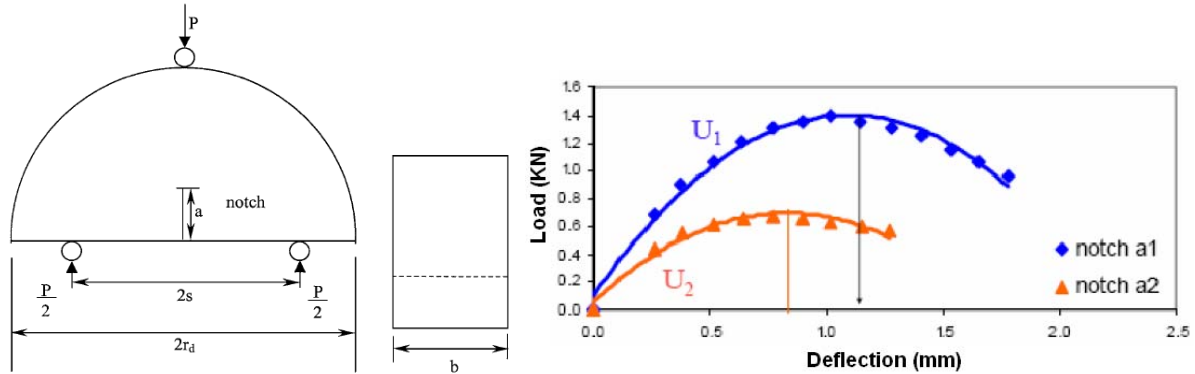


Fig. 2- 34 Curva carga - deflexión ensayo SCB
(Fuente: Mull et al., 2002 ; Molenaar et al., 2005)

Los ensayos DC(T) y SCB han sido utilizados en diversas investigaciones para evaluar la energía de fractura disipada en mezclas bituminosas, entre las que se destacan los estudios desarrollados por Wagoner (2005a) y Molenaar (2000) en los cuales se describen las metodologías y se realizan los primeros análisis de la variación de las características mecánicas conforme a distintas variables presentes en su fabricación.

Uno de los estudios más recientes, desarrollado por Li et al. (2008), se centró en estudiar el efecto de varios factores en la energía de fractura disipada en el proceso de fisuración en las mezclas bituminosas a bajas temperaturas utilizando ambos ensayos, el DC(T) y el SCB. Li señala en su estudio que la temperatura es una de las variables que más efecto tiene en la energía de fractura indicando que existe un cambio de la mezcla desde un comportamiento frágil a cuasi frágil a medida que aumenta la temperatura, tal como se observa en la Fig. 2- 35.

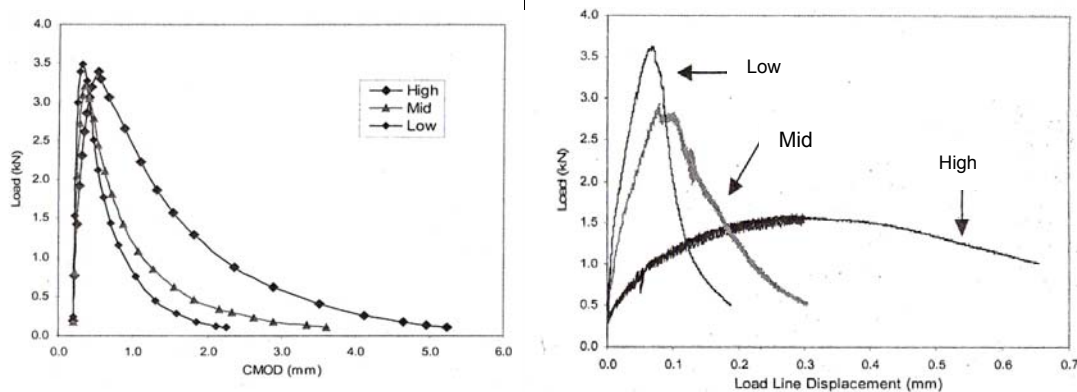


Fig. 2- 35 Curva carga-desplazamiento de los ensayos DC(T) y SCB a diferentes temperaturas
(Fuente: Li et al., 2008)

- **Barcelona tracción directa, BTB**

El ensayo Barcelona Tracción Directa, BTB, ilustrado en la Fig. 2- 36 fue desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña. Mediante la aplicación de este ensayo se pueden determinar propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas dentro de las cuales se encuentra la energía de fractura. En un principio este ensayo fue ideado con la finalidad de estudiar el comportamiento de materiales bituminosos antifisuras (Fonseca, 1995), pero actualmente se ha utilizado tanto para el estudio del comportamiento de las mezclas a fatiga como para la caracterización de los ligantes bituminosos a partir de su tenacidad y energía de rotura (Pérez et al., 2005a).

La metodología del ensayo BTB consiste básicamente en someter a una probeta cilíndrica, en cuya base se ha creado una entalladura, a un esfuerzo de tracción paralelo a esta base y perpendicular a la entalladura de la probeta. Durante el ensayo, realizado a velocidad de desplazamiento constante, se va produciendo la apertura de la entalladura, lo que provoca la fisuración de la probeta. El criterio de fallo establecido es el instante cuando se registra la carga cero o desplazamiento al cual se da la rotura total de la probeta. La velocidad de aplicación del desplazamiento se puede variar para poder obtener completa la parte de la curva posterior al punto de fractura pico, o sea la parte de relajación; con esto se simula la abertura lenta de la grieta por efecto de la temperatura (Pérez et al., 2005).

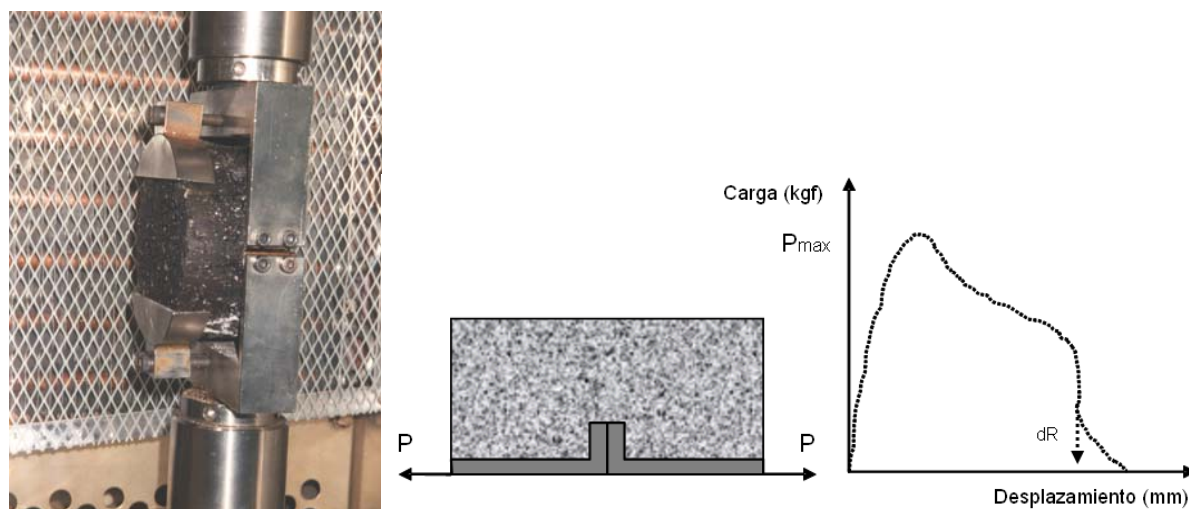


Fig. 2- 36 Montaje, esquema y curva carga – desplazamiento del ensayo BTB
(Fuente: Pérez et al., 2005a)

Una ventaja que presenta el ensayo BTB es la facilidad de para fabricar las probetas, ya que sigue la misma metodología que la utilizada para el método Marshall. El ensayo ha sido aplicado también para medir la cohesión y la tenacidad de diferentes tipos de ligantes utilizados en

mezclas bituminosas. Esto se realiza mediante la utilización de una mezcla con una granulometría estándar con áridos de bajo tamaño máximo y sin presencia de filler.

En la Fig. 2- 37 se puede observar las curvas fuerza desplazamiento resultantes de la aplicación del ensayo BTB en una mezcla fabricada con un ligante B 60/70, a diferentes temperaturas de ensayo. En ella se aprecia la sensibilidad del ensayo, mostrando la mezcla un comportamiento más frágil y presentando mayores resistencias en la mezcla a bajas temperaturas, mientras que a altas temperaturas la mezcla muestra un comportamiento más dúctil, alcanzando menores resistencias.

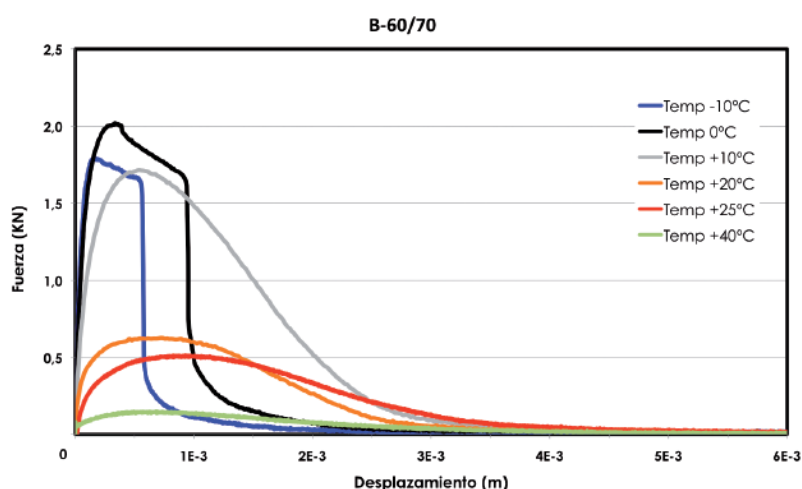


Fig. 2- 37 Curvas fuerza - desplazamiento (BTB) para evaluar la tenacidad del ligante B 60/70 a diferentes temperaturas de ensayo
(Fuente: Hernández, 2009)

Un inconveniente que presenta el ensayo BTB es su aplicación a testigos, producto de la metodología de fabricación de la probeta.

- **Cataluña tracción directa, CTD**

El Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña desarrolló un ensayo simple de tracción directa aplicado a probetas prismáticas llamado Cataluña Tracción Directa, CTD, el cual se observa en la Fig. 2- 38.

Mediante el ensayo CTD se puede determinar la tenacidad y la deformación de rotura de la mezcla, parámetros que en general, no se contemplan en el diseño de las mezclas y que repercuten de manera definitiva en su comportamiento mecánico. La ventaja que presenta esta metodología respecto al ensayo BTB, desarrollado anteriormente, es principalmente su aplicabilidad tanto a probetas fabricadas en laboratorio como a testigos extraídos 'in situ'. Así también, se destaca que el campo tensional generado en la probeta, permite una fácil

interpretación de los resultados y su aplicabilidad al cálculo de parámetros del material comúnmente utilizados en ingeniería (Pérez et al., 2007).

La metodología del ensayo CTD consiste en someter las probetas prismáticas a un ensayo simple de tracción directa a la temperatura que se desea evaluar. Para la realización del ensayo se utiliza una prensa que dispone de una cámara ambiental capaz de controlar la temperatura con una precisión de ± 1 °C. Las probetas tienen a ambos lados una hendidura en su parte central, realizada mediante un pequeño corte con una sierra de disco, con el objetivo de tener una sección más pequeña donde se induzca el fallo. Antes de ensayar las probetas, estas se colocan a temperatura de ensayo. El ensayo se realiza mediante control de desplazamiento del pistón, aplicando un desplazamiento a una velocidad constante de 0,1 mm/min hasta llegar a la rotura total de la probeta. Esta velocidad es suficientemente baja como para poder considerar el ensayo estático. En el sistema de adquisición de datos se registra la carga aplicada y la deformación producida mediante unos extensómetros de 25 mm de base situados a ambos lados de las entalladuras, tal cual se ilustra en la Fig. 2- 38.



Fig. 2- 38 Montaje del ensayo CTD y superficie de fractura de probeta ensayada
(Fuente: Laboratorio de Caminos, UPC)

- **Dog-bone direct tension, DBDT**

El ensayo Dog-Bone Direct Tension, DBDT, ha sido desarrollado recientemente por la Universidad de Florida y su montaje puede observarse en la Fig. 2- 39. A través de este procedimiento se pueden obtener parámetros de fractura y rigidez, y permite evaluar el comportamiento a la fisuración de las mezclas bituminosas.

El procedimiento DBDT fue desarrollado con la finalidad de reducir y mejorar las desventajas de los ensayos usuales de tracción directa. Según Koh et al. (2009) las desventajas de los ensayos convencionales de tracción directa se resumen en:

- Existencia de una fuerte concentración de tensiones cercana a los extremos de las probetas.
- Influencia de la alineación de la muestra en el plano de fallo.
- La preparación de la muestra requiere un largo tiempo y un técnico especializado.
- El plano de falla se supone que se produce en el centro de la muestra, perpendicular al eje vertical, pero en la práctica, esto puede ocurrir en cualquier ubicación de la probeta.
- Problemas de repetibilidad de los ensayos.

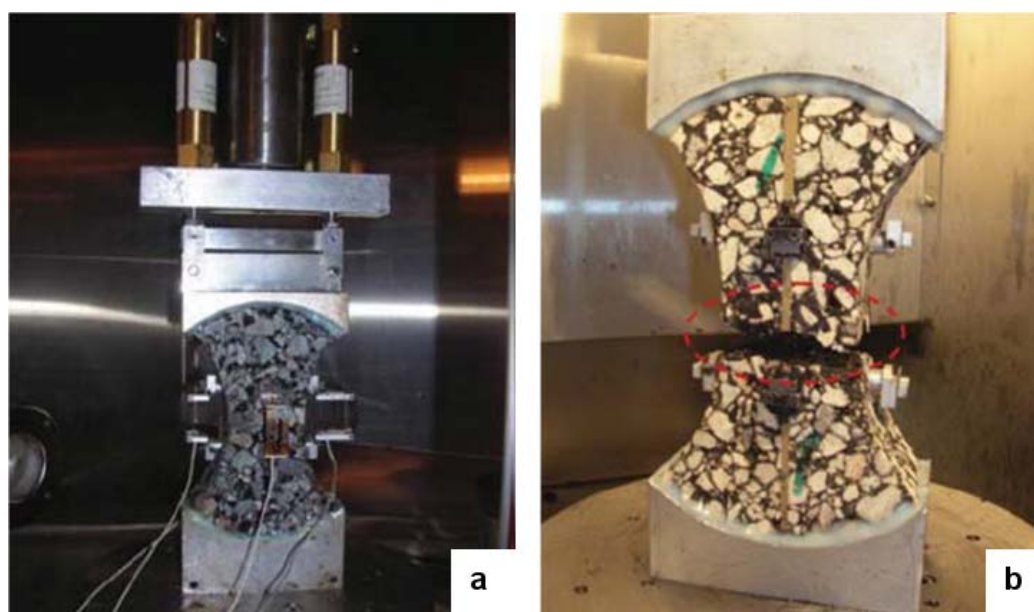


Fig. 2- 39 Montaje del ensayo DBDT (a) y la probeta una vez realizado el ensayo (b)
(Fuente: Koh et al., 2009)

De acuerdo a lo señalado por Koh et al. (2009), autores del ensayo DBDT, este procedimiento posee las ventajas de ser un ensayo a tracción directa y al mismo tiempo reúne los requerimientos en cuanto a su funcionalidad, puesto que posee las ventajas de que las muestras tienen un plano de falla conocido, que su geometría permite que las muestras se puedan fabricar de probetas cilíndricas o testigos, y a su vez, se puede aplicar a todo tipo de mezclas. Sin embargo, la metodología de fabricación de las probetas y los complejos equipos requeridos dificultan una aplicación práctica de este ensayo.

Debido a la reciente creación del procedimiento DBDT no existen publicaciones que detallen en profundidad su procedimiento. Sin embargo, Koh et al. (2009) señalan que en pruebas preliminares han efectuado los ensayos a una tasa de desplazamiento constante de 50,08 mm/min hasta el fallo de la probeta.

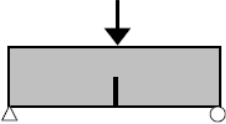
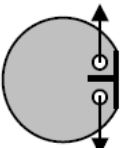
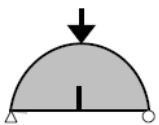
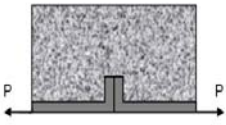




Tanto el ensayo CTD como el DBDT presentan nuevamente el problema de que la fractura de la probeta se realiza de forma brusca, lo que no permite analizar el comportamiento de los materiales ensayados en su zona postpico, o también llamada, zona de softening, en la cual se puede evaluar el comportamiento de los materiales frente a su capacidad para mantener unidos sus componentes una vez que ha resistido ya su carga máxima. En el caso de las mezclas bituminosas, que se caracterizan por tener un comportamiento flexible y dúctil es importante analizar bien esta zona de rotura. El análisis de la zona de softening presenta una importancia igual o superior a la zona prepico, ya que cuando se emplean ligantes modificados, por ejemplo, la diferencia de respuesta de la mezcla se observa en la zona de rotura postpico, presentando un comportamiento más dúctil y con una mayor capacidad de deformación en este tipo de mezclas.

A modo de resumen se puede observar en la **Tabla 2- 3** las diferentes geometrías, junto con las ventajas y limitaciones de los diferentes ensayos desarrollados para evaluar la energía de fractura en mezclas bituminosas, expuestos en este punto.



Tabla 2- 3 Diferentes geometrías de los ensayos desarrollados para determinar propiedades de fractura en las mezclas bituminosas

Tipo de ensayo	Ventajas	Limitaciones	Área de fractura (mm ²)
Single - edge notched beam SE(B) 	Simple configuración de carga Mayor área de fractura	Presenta dificultad en su aplicación a testigos	7500
Disk-shaped compact test DC(T) 	Mayor área de fractura Ensayo de fractura normalizado (ASTM D7313-07)	Complejidad en la elaboración de probetas y aplicación a testigos Desviación de la fisura Temperatura de ensayo	5500 e = 50 mm l = 110 mm
Semi-circular bending test SCB 	Fácil aplicación a probetas y testigos. Simple configuración de cargas Menor cantidad de muestras y testigos	Complejo estado tensional Lugar de aplicación de la carga influye en la correcta propagación de la fisura	3750 e = 50 mm l = 75 mm
Barcelona Tracción Directa BTD 	Fácil elaboración de probetas	No aplicable a testigos Granulometría específica	3549 e = 35 mm l = 101,4 mm
Cataluña Tracción Directa CTD 	Estado tensional de tracción pura Fácil interpretación de los resultados	Menor área de fractura. Elaboración de las probetas y su aplicación a testigos Repetibilidad del ensayo	2000 e = 40 mm l = 50 mm
Dog-Bone Direct Tension Test, DBDT 	Concentración de tensiones localizadas en plano de falla Plano de falla conocido Fabricación a partir de probetas cilíndricas Aplicación a testigos	Equipos requeridos Dificultad de la fabricación de probetas	No se registran dimensiones exactas (fabricación a partir de probeta compactador giratorio $\phi=150$ mm) e= 1.5 pulg. Mezclas densas e= 2 pulg. Mezclas abiertas

2.7.2 Fatiga

En ingeniería, y en especial, en la ciencia de materiales, la fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce ante cargas inferiores a las cargas estáticas que producirían la rotura, es decir, el fenómeno de fatiga está asociado al deterioro que se produce en un material a consecuencia de la aplicación de cargas repetidas con una magnitud muy inferior a la resistencia máxima que puede soportar el material (Brown et al., 2001).

Los primeros estudios de fatiga de materiales se realizaron en metales. En un comienzo, en el año 1845 Rankine demostró que la reducción de las concentraciones de tensiones alargaba la vida de este material. Posteriormente, hacia 1860, Wöhler desarrolló diversas máquinas de ensayo para el estudio sistemático del fenómeno de fatiga. Wöhler extrajo dos conclusiones de aquellos ensayos: la primera, que las fuerzas necesarias para provocar la rotura con cargas dinámicas son muy inferiores a las necesarias en el caso estático, y la segunda, que existe un umbral por debajo del cual las probetas no se rompían, denominado “límite de fatiga” (Fig. 2- 40).

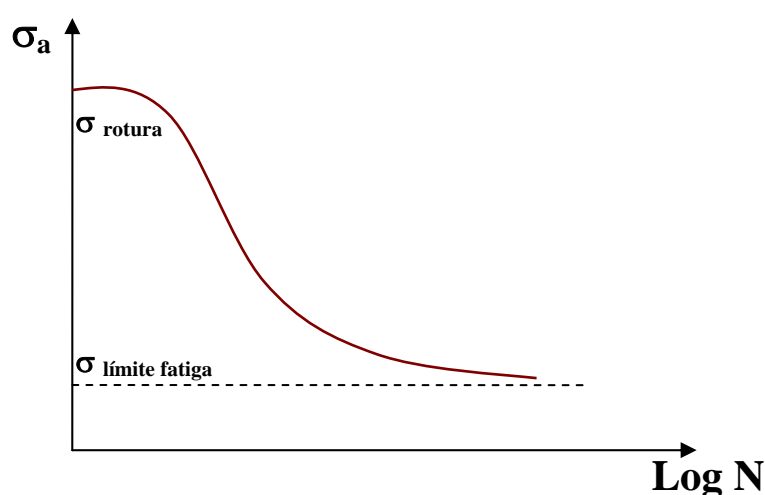


Fig. 2- 40 Curva de Wöhler – Tensión v/s Log N° de ciclos de carga - Límite de fatiga

Los estudios iniciados por Wöhler sobre fatiga en metales han sido aplicados al estudio de la vida a fatiga de muchos materiales. Actualmente sus diagramas S-N son ampliamente utilizados, Los resultados se representan en un diagrama de tensión, S, frente al logaritmo del número N de ciclos hasta la rotura para cada una de las probetas. Los valores de S se toman normalmente como amplitudes de la tensión σ_a (Cepeda, 2002).

El comportamiento de los materiales frente al fenómeno de fatiga puede presentar dos comportamientos extremos. El primero, a mayor tensión aplicada, presentará un menor número

de ciclos hasta rotura, y el segundo, a menor tensión aplicada, el número de ciclos hasta la rotura será mayor, existiendo para cada material, una tensión límite de fatiga, por debajo de la cual, la rotura por fatiga no ocurrirá.

La curva de Wöhler graficada en escala doblemente logarítmica da como resultado una línea llamada ley de fatiga, ilustrada en la Fig. 2- 41 y está definida por la expresión matemática que se observa en la ecuación (2. 6).

$$\varepsilon, \sigma = A \cdot N^{-b}$$

(2. 6)

Donde,

ε : Deformación unitaria inicial

σ : Tensión inicial

N : Número de aplicaciones de carga hasta el fallo por fatiga

A, b : Parámetros de la ley de fatiga

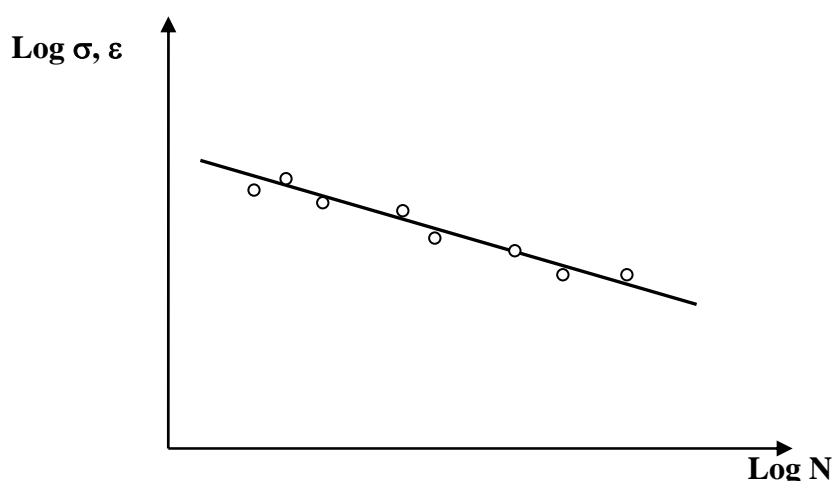


Fig. 2- 41 Curva de Wöhler Log Tensión, Log Deformación v/s Log N° de ciclos de carga

2.7.2.1 La fatiga en mezclas bituminosas

La fisuración por fatiga de las capas de mezcla bituminosa es uno de los mecanismos de deterioro más frecuentes en los pavimentos bituminosos. Este fenómeno es producido principalmente por la repetición de las cargas producidas por el tráfico en el firme, las cuales van dando lugar a la progresiva fisuración y rotura de las capas de mezcla bituminosa del firme,

Fig. 2- 42.

A pesar de no generarse tensiones superiores a la resistencia intrínseca del material a la rotura por tracción en su fibra inferior, la repetición y acumulación de cargas producidas por el tráfico de vehículos, genera en principio, una microfisuración, y consecuente el deterioro va progresando hasta que finalmente se produce el fallo por fatiga del firme.

Es importante destacar que actualmente se considera que el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas es un parámetro fundamental en el dimensionamiento del firme y por tanto es muy importante considerar como esta propiedad es tenida en cuenta tanto en los métodos de dimensionamiento, como en el proyecto de la mezcla (Pérez et al., 2005b).

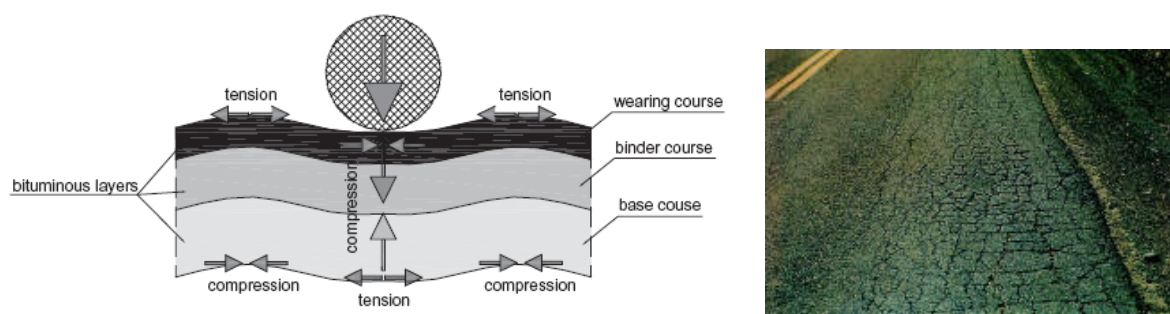


Fig. 2- 42 Tensiones y deformaciones producidas por cargas de tráfico en las capas bituminosas del firme, y pavimento fisurado severamente por fatiga.
(Fuente: Racanel et al., 2009; Pavement Tools Consortium)

Hveem en 1955 fue uno de los primeros investigadores que se refirió al fenómeno de fatiga en mezclas bituminosas. Hveem concluyó que existía una correlación entre las grietas producidas por fatiga y las medidas de deflexión realizadas en un pavimento. En este contexto Hveem sugirió que para que un pavimento bituminoso tenga una buena respuesta a fatiga debe poder mantener las medidas de deflexiones en un nivel permisible, o bien, aumentar la rigidez de éste, de manera de reducir el nivel de deflexiones (Carpenter, 2006).

Una de las propiedades que poseen las mezclas bituminosas es la capacidad de admitir una acumulación de daño, lo que se traduce en que el proceso de fisuración se produzca de una forma gradual y no de manera rápida como ocurre en materiales frágiles. Desde este punto de vista, para el análisis de la fatiga suele admitirse la validez de la Ley de Miner, que dice que cada carga aplicada genera un consumo de fatiga, y estos consumos se acumulan hasta agotar la resistencia a la fatiga de la mezcla bituminosa (Carpenter, 2006; González et al., 2006, Hernández, 2009; Lugmayr et al., 2009).

La ley de Miner se generaliza en el caso de un gran número de secuencias de cargas repetidas, de amplitud diferente para cada una, estableciendo el fallo, o la condición de ruptura por fatiga, cuando el daño alcanza el valor de 1, y se expresa por la ecuación (2. 7).

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$$

(2. 7)

Donde,

- D : Daño por fatiga
 n_i : Número de repeticiones de carga
 N_i : Número admisible de repeticiones de carga

De acuerdo a lo señalado por Kanitpong y Bahía (2005), durante el proceso de fatiga existe una pérdida continua de resistencia y degradación de la mezcla bituminosa, lo cual resulta en la formación de microgrieta en un principio hasta la degradación total.

El concepto anterior lo expresan Baaj y Di Benedetto (2005), señalando que el proceso de degradación de fatiga de una mezcla bituminosa, se puede establecer en tres etapas o fases (Fig. 2- 43). La fase I, también llamada fase de adaptación, se caracteriza por el inicio de la microfisuración, produciéndose un descenso rápido del módulo dinámico, lo cual no se atribuye únicamente a un fenómeno de fatiga, sino más bien a un fenómeno combinado, producto de la tixotropía del material y a un calentamiento inicial debido a la aplicación de las cargas cíclicas del ensayo. La fase II, llamada también, fase de fatiga, se caracteriza por el rol más preponderante que toma el deterioro por fatiga en la evolución del daño de la mezcla, apareciendo en ésta las macrofisuras producto de la unión de las microfisuras generadas en la fase anterior. Finalmente se encuentra la fase III, o fase de ruptura, en la cual las macrofisuras progresan rápidamente hasta el fallo total de la mezcla.

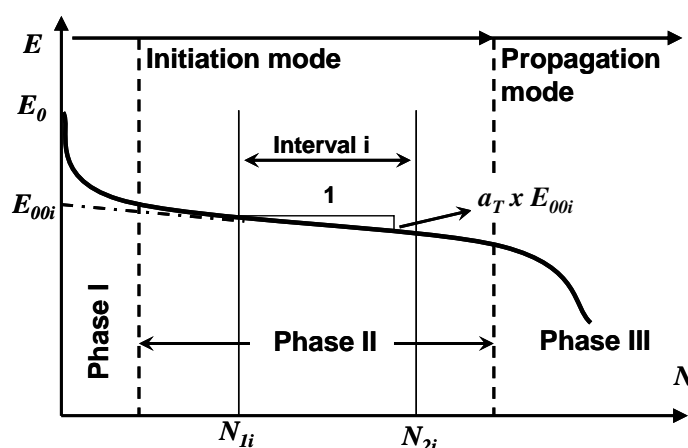


Fig. 2- 43 Fases de degradación por el fenómeno de fatiga
(Fuente: Baaj y Di Benedetto, 2005)



Otro método para explicar la fisuración por fatiga en las mezclas bituminosas es mediante la fractura mecánica de los materiales. De acuerdo con Roque et al. 2002, para un material dado, la fisura se propaga cuando el estado de tensiones alcanza una condición crítica, dependiente de la tenacidad y ductilidad del material, de ahí nace el concepto de propagación de fisuras, que puede ser determinado mediante la relación establecida y conocida como “ley de Paris”, ilustrada en la ecuación (2. 7). La ley de Paris propone una relación que determina una tasa o velocidad de propagación de fisuras que vincula la velocidad de crecimiento de la fisura con el estado de tensiones en las proximidades de la fisura caracterizado por el denominado factor de intensidad de tensiones “K”.

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n$$

(2. 8)

Donde,

da/dN: Tasa de propagación de fisura (mm/ciclo).

a: Longitud de la fisura.

N: Número de repeticiones de carga.

A y n: Parámetros dependientes de la mezcla determinados en laboratorio.

ΔK : Diferencia entre el máximo y mínimo factor de intensidad de tensiones registrados.

De acuerdo con lo anterior, Roque et al. (2002) y Jajliardo (2003) muestran el fenómeno de desarrollo de la fisuración por fatiga, mediante una gráfica logarítmica, ilustrada en la Fig. 2- 44, donde por el lado de las ordenadas se grafica la velocidad de propagación de la fisura (da/dN) y por el eje de las abscisas se ubica las diferencias de factores de intensidad de tensiones (ΔK) durante el estado de repetición de cargas del ensayo de fatiga. En la Fig. 2- 44, se identifican 3 etapas, la fase de iniciación, donde las microfisuras se desarrollan, la fase de propagación, en la cual las microfisuras se convierten en macrofisuras, donde el crecimiento de la fisura es estable, y la fase de desintegración, donde el material falla completamente y el crecimiento o desarrollo de la fisura se vuelve inestable.

En general, la velocidad de propagación de la fisura depende de factores como el material donde se propaga, el estado de tensiones en las proximidades de la punta de la fisura y la propia longitud de la fisura.

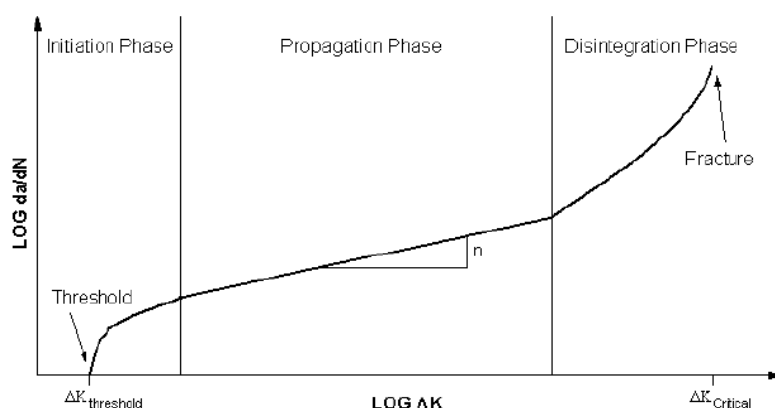


Fig. 2- 44 Propagación de la fisura mediante ensayo de fatiga
(Fuente: Roque et al., 2002)

Otro concepto importante de referir que caracteriza a los materiales y a las mezclas bituminosas, fue el ya definido por Wöhler como límite de fatiga. Según Carpenter (2006), varios investigadores han propuesto para las mezclas bituminosas la utilización de un límite de fatiga, o también llamado “*Fatigue Endurance Limit*” (*FEL*), como una propiedad específica de las mezclas bituminosas. Este límite de fatiga se define como la deformación unitaria de tracción por debajo de la cual no ocurren daños, es decir que bajo esa condición el firme se transforma en resistente a la fatiga cualquiera sea el número de repeticiones de carga a la que se vea sometido, siempre que las mismas le provoquen esos niveles bajos de deformación.

El límite de fatiga es determinado en ensayos a fatiga realizados en niveles de deformación más bajos que los realizados convencionalmente, según Carpenter (2006), generalmente entre 100 y 70 microdeformaciones, lo que produce que las curvas o leyes de fatiga cambien su comportamiento disminuyendo su pendiente o el factor “b” de la ley de fatiga, tal como ilustra en la Fig. 2- 45.

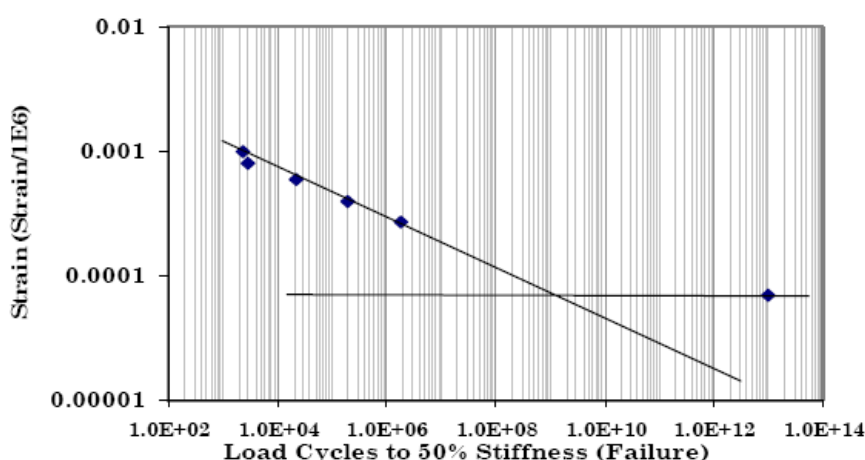


Fig. 2- 45 Ley de Fatiga con límite de fatiga
(Fuente: Carpenter, 2006)



2.7.2.2 Ensayos para evaluar la respuesta a fatiga en mezclas bituminosas

La determinación del comportamiento a fatiga y el establecimiento de las leyes de fatiga de las mezclas bituminosas, se basa actualmente en la información obtenida de ensayos cíclicos de laboratorio, que permiten conocer la evolución de las propiedades de la mezcla al incrementar el número de ciclos de aplicación de cargas.

En la realización de ensayos para la evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas se contemplan dos tipos, unos realizados a tensión controlada, en que se mantiene constante la carga máxima aplicada en cada ciclo de carga, y otros efectuados a deformación o desplazamiento controlado, en cuyo caso se mantiene constante la deformación o desplazamiento máximo aplicado. La realización de estos ensayos, sobretudo los realizados a deformación controlada, han dado lugar a una clara y nítida fisuración de la probeta, lo que permite el establecimiento de diferentes niveles de fallo, que tienen una gran importancia en la interpretación y análisis de los resultados.

De acuerdo a lo señalado por **Alonso (2006)**, los ensayos de fatiga que se realizan en el laboratorio intentan someter a las probetas de mezcla a unas sollicitaciones similares a las que se producen en el firme, lo cual resulta muy difícil, puesto que existe una complejidad de estas tensiones en el firme, producto de los cambios en los tipos de cargas sollicitantes y condiciones de velocidad y temperatura. Esto produce una serie de cambios en el estado tensional de la estructura, en la cual varían al mismo tiempo los esfuerzos axiales y cortantes aplicados.

Por otra parte, el tipo de cargas a las que se somete a las probetas en el laboratorio es mucho más sencillo, aplicándose sobre la sección sometida a fatiga únicamente cargas que producen esfuerzos de flexotracción o de tracción pura. En la **Fig. 2- 46** se puede apreciar un esquema de los diferentes procedimientos aplicados actualmente en diferentes países europeos para determinar el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas.

Type	Test Geometry	Type of loading/ Country of the team	Amplitude (10^{-6} m/m or MPa)
T/C		Tension-Compression « Homogeneous » F_1, S_1	Strain : (80), 100, 140, 180 Stress : 0.9
2PB		Two Point Bending « Non Homogeneous » F_2, B_1, B_2	Displacement; max strain: 140,180, 220 Load; max stress : 1.4
3PB		Three Point Bending « Non Homogeneous » N_1	Displacement; max strain: 140,180, 220 Load; max stress : 1.4
4PB		Four Point Bending « Non Homogeneous » N_2, P, PL, UK	Displacement; max strain: 140,180, 220 Load; max stress : 1.4
IDT		Indirect Tensile Test « Non Homogeneous » S_2	Load; max strain at first cycle: ~25, ~40, ~65

Fig. 2- 46 Procedimientos para determinar el comportamiento a fatiga en mezclas bituminosas
(Fuente: Di Benedetto et al., 2003)

De acuerdo a lo señalado por Di Benedetto et al. (2003), países como Francia y Bélgica su experiencia es mayor en ensayos a fatiga como la viga de dos puntos a flexión, mientras que países como Holanda, Portugal e Inglaterra han adoptado el procedimiento de la viga a flexión en 4 puntos.

En España, la experiencia se basa en el ensayo 3PB – Three Point Bending – correspondiente al ensayo de fatiga de viga a flexión en tres puntos, puesto que está normalizado bajo la norma española NLT 350/90, y actualmente este procedimiento viene recogido en la norma europea UNE-EN 12697-24:2006. De acuerdo a lo anterior, en este trabajo de tesis doctoral los ensayos de laboratorio realizados a fatiga se llevaron a cabo mediante este procedimiento, cuyo montaje se observa en la Fig. 2- 47.

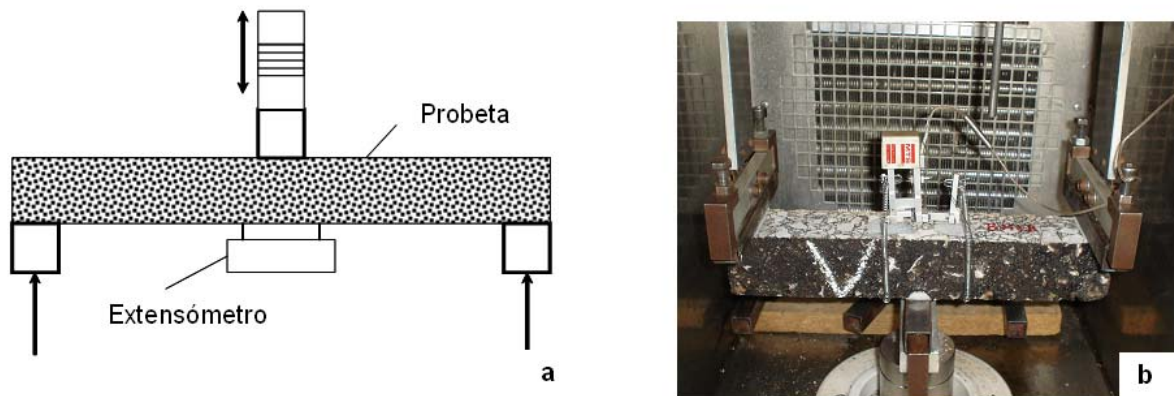


Fig. 2- 47 Ensayo de fatiga de viga a flexotracción en tres puntos.
 (a) Esquema ensayo. (b) Montaje ensayo.

La metodología para la elaboración de probetas y ejecución del ensayo se muestra con más detalle en el capítulo siguiente, pero básicamente el ensayo consiste en someter una probeta prismática, apoyada en sus extremos y sujeta en su centro, a un desplazamiento de éste que varía con el tiempo según una función sinusoidal, de forma: $D = D_o \sin(2\pi Ft)$ (Fig. 2- 48), hasta el fallo de la probeta.

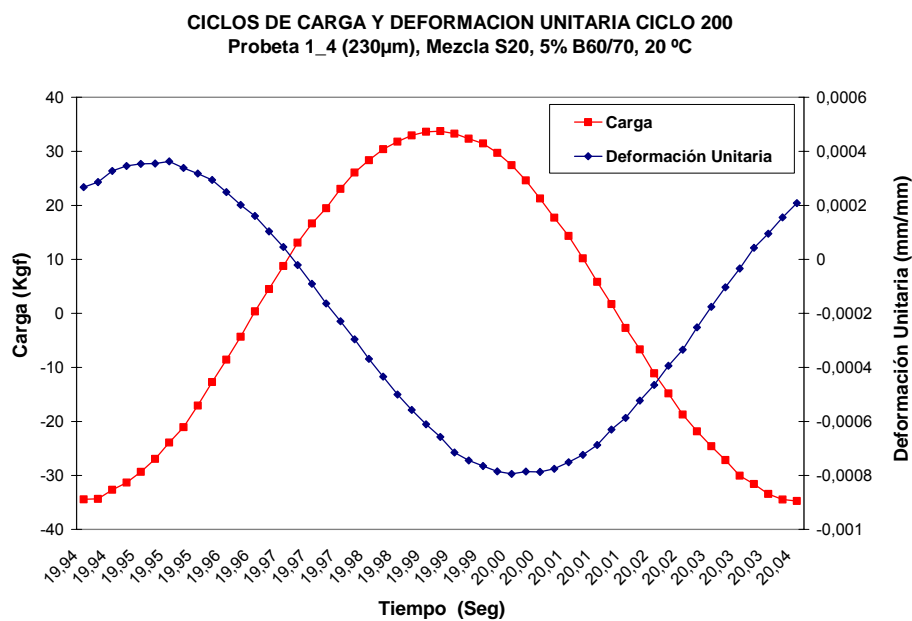


Fig. 2- 48 Función carga y desplazamiento en el ciclo 200 de probeta ensayada a fatiga a flexotracción

2.7.2.3 Criterios de fallo aplicados a la fatiga de mezclas bituminosas

En la revisión de la literatura se ha encontrado una serie de criterios o enfoques para caracterizar o representar los mecanismos de inicio, desarrollo y propagación de las fisuras hasta su fallo por fatiga en las mezclas bituminosas. En este contexto, los enfoques que se presentan en este punto de la tesis doctoral, son los más referenciados y corresponden al enfoque clásico o tradicional, al enfoque de energía disipada y finalmente al enfoque o criterio desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, correspondiente al de deformación crítica.

- **Enfoque tradicional o clásico**

Uno de los criterios más ampliamente utilizados en la caracterización del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas ensayadas en laboratorio, es el criterio clásico. Este criterio establece o considera la rotura de la probeta cuando la rigidez de la mezcla alcanza la mitad del valor que tenía inicialmente.

Para ensayos controlados por deformación o desplazamiento, la rotura o fallo de la probeta se producirá en el ciclo en que la carga inicial, F_0 , se reduzca a la mitad de la misma, $F_0/2$, tal como se observa en la Fig. 2- 49 a.

Por otra parte, para los ensayos controlados por carga, la rotura o fallo de la probeta se producirá en el ciclo en que el desplazamiento, D_0 , sea igual al doble del desplazamiento inicial, $2D_0$, tal como se observa en la Fig. 2- 49 b.

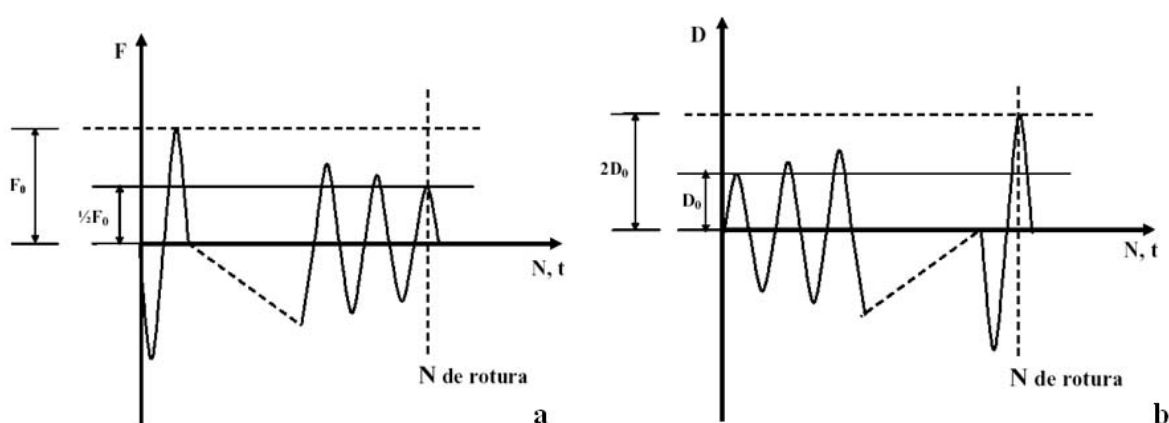


Fig. 2- 49 Criterio clásico de fallo por fatiga.
(a) Ensayo controlado por desplazamiento, (b) Ensayo controlado por carga
(Fuente: Alonso., 2006)

La ley de fatiga de una mezcla bituminosa es obtenida a partir del ensayo de múltiples probetas a diferentes niveles de tensión, desplazamiento y/o deformación controlada. Cada ensayo entrega un punto dentro de la ley de fatiga de la mezcla bituminosa, que para el caso de ensayos realizados a desplazamiento controlado, se obtiene una ley de fatiga tal como se observa en la Fig. 2- 50. Esta última se determina relacionando las deformaciones máximas iniciales producidas en el centro de la probeta, con el número de ciclos necesarios para reducir la rigidez de la probeta a la mitad, obteniendo pares de valores correspondientes a varios ensayos a diferentes amplitudes de desplazamiento, que permiten definir la ley de fatiga en deformación con control en desplazamiento.

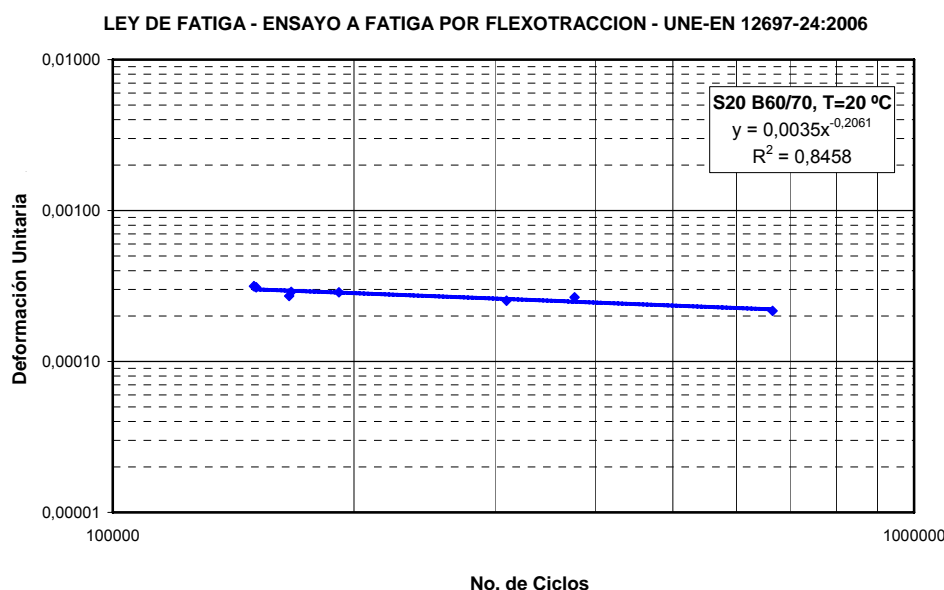


Fig. 2- 50 Ley de fatiga de una mezcla bituminosa mediante ensayo a flexotracción en tres puntos UNE-EN 12697-24:2006

- **Enfoque de energía disipada**

El enfoque de la energía disipada en el proceso de fatiga establece una relación entre la vida a fatiga y la energía total acumulada que puede disipar el material hasta su fallo durante el desarrollo de un ensayo cíclico, independiente de las variables que se establezcan para realizar el ensayo, ya sea el tipo de prueba, o bien, la temperatura con la cual se ejecute.

La energía disipada durante un ciclo de un ensayo a fatiga se puede determinar por medio de la ecuación (2. 9), la cual equivale al área del bucle de histéresis de la curva tensión deformación, tal cual se observa en la Fig. 2- 51.

$$W_i = \pi \cdot \sigma_i \cdot \varepsilon_i \cdot \sin(\phi_i)$$

(2. 9)

Donde,

W_i : Energía disipada en el ciclo i

σ_i : Amplitud de tensión en el ciclo i

ε_i : Amplitud de deformación en el ciclo i

ϕ_i : Ángulo de desfase entre la función de tensión y deformación en el ciclo i

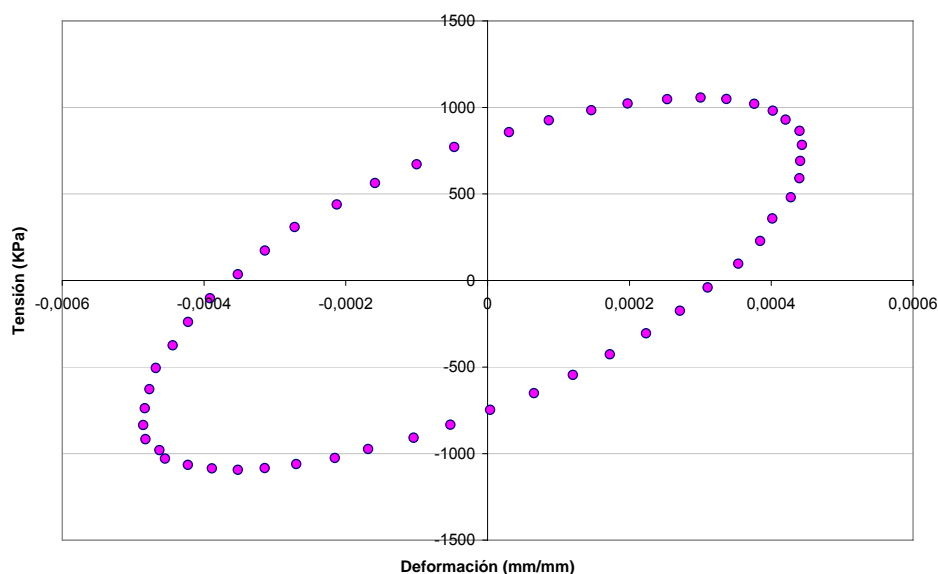


Fig. 2- 51 Ciclo de histéresis curva tensión – deformación

Para el caso de ensayos realizados a deformación controlada, la curva de energía disipada en función de los ciclos de carga, crece hasta encontrar un valor máximo donde es constante, valor que indica el lugar donde se produce el fallo. Por otra parte, para ensayos a tensión controlada, la energía aumenta con cada ciclo de carga hasta un punto donde crece de forma exponencial, indicando el ciclo donde se produce el fallo (Reyes, 2009).

Sumado a lo anterior, existe el ratio de energía disipada (DER), señalado en la ecuación (2. 10). De acuerdo a los autores Pronk y Hompmann (1990), en ensayos a deformación controlada, el punto donde se inician las microgrietas y se transforman en una fisura clara, se establece cuando la línea tangente a 45° de la curva de proporción de energía disipada con los ciclos de carga, se separa. Mientras que en los ensayos a tensión controlada, corresponde a su valor máximo, tal como se observa en la Fig. 2- 52.

$$DER = \frac{\sum_{i=1}^n \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin(\phi_i)}{\pi \sigma_n \varepsilon_n \sin(\phi_n)} \quad (2.10)$$

Donde,

σ : Amplitud de tensión

ε : Amplitud de deformación

ϕ : Ángulo de desfase entre la función de tensión y deformación

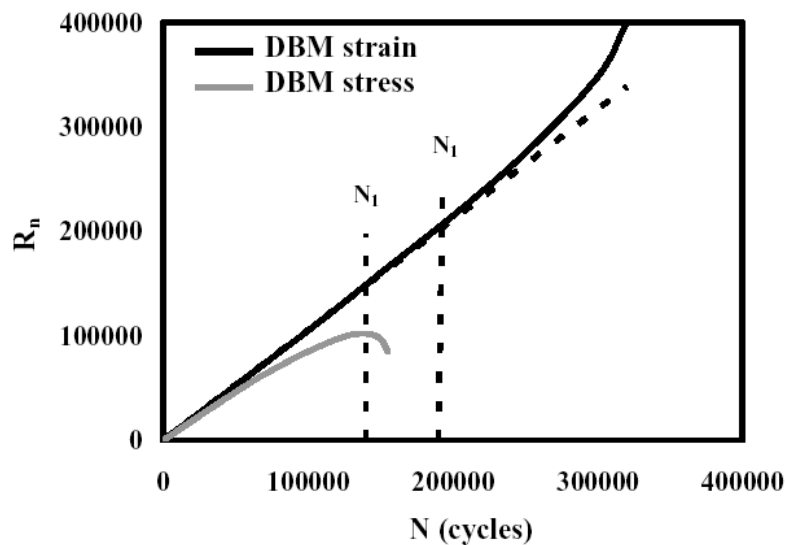


Fig. 2- 52 Definición de ciclo de fallo mediante el criterio de ratio de energía disipada, en ensayos a tensión y deformación controlada
(Fuente: Reyes, 2009)

- **Enfoque de la deformación crítica**

Estudios llevados a cabo en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña mediante una serie de ensayos a fatiga, entre los que se encuentran el ensayo a flexotracción en tres puntos y los ensayos CTD y BTB en su modalidad dinámica, han permitido establecer un nuevo criterio de fallo por fatiga llamado “Deformación Crítica”.

Los resultados obtenidos de la aplicación de estos ensayos en su modalidad dinámica han puesto de manifiesto que en un ensayo de fatiga a tensión o desplazamiento controlado, al ir aumentando el número de ciclos aumenta la deformación producida y existe un nivel de deformación a partir del cual el proceso de fatiga se propaga rápidamente (deformación crítica), independientemente del estado de tensiones a que ha estado sometida la probeta durante su proceso de fatiga, Fig. 2- 53.

Lo anterior se traduce en que si se aplica una tensión grande, la deformación inicial producida será mayor y ésta irá aumentando en cada aplicación de carga hasta llegar a la deformación crítica, que es cuando el proceso de fatiga acelerará hasta la rotura del material. Por otra parte, si se aplica una carga pequeña esta deformación será menor, pero aumentará igualmente en cada aplicación de carga hasta un nivel de deformación igual al caso anterior (deformación crítica), a partir del cual la fisura progresa rápidamente hasta la rotura del material (Pérez et al., 2005b).

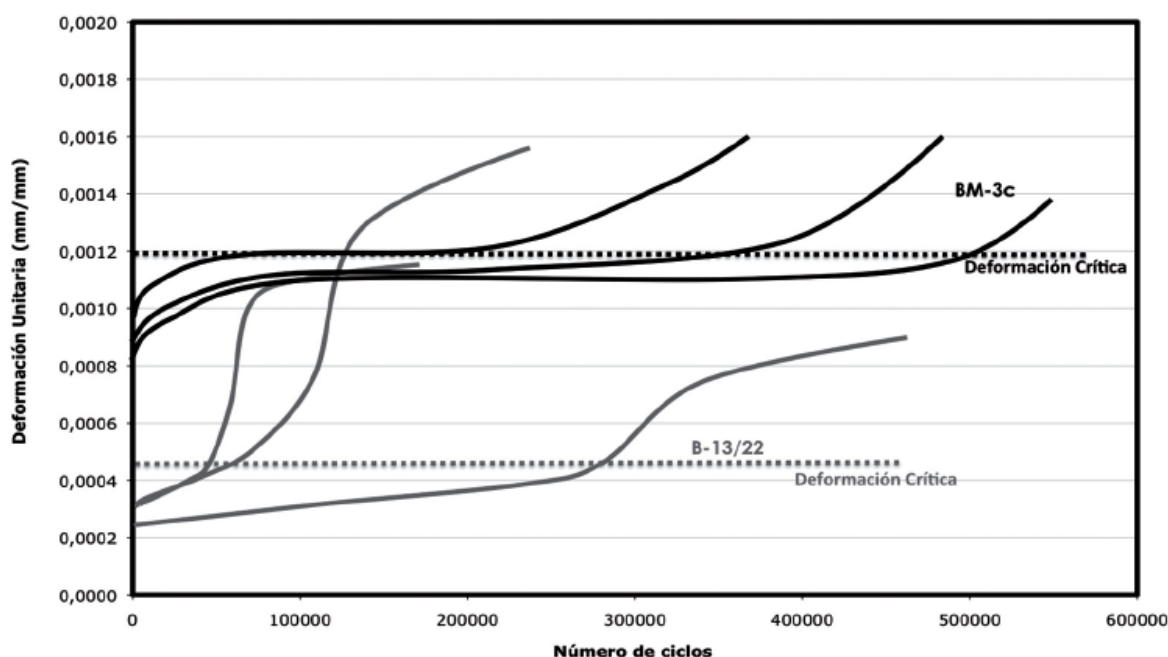


Fig. 2- 53 Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga.
Ensayo de fatiga a Flexotracción.
(Fuente: Hernández., 2009)

2.7.2.4 Predicción del comportamiento a fatiga de las mezclas

Han sido varias las investigaciones que han tratado de establecer por medio de procedimientos más simples una predicción del comportamiento a fatiga de las mezclas. El problema que se pretende resolver es que debido a la complejidad y tiempo de ejecución de los ensayos cíclicos o dinámicos que evalúan la respuesta de las mezclas asfálticas a la fatiga, hacen que esta propiedad no se considere usualmente durante la etapa de diseño de las mezclas bituminosas.

Utilizando el enfoque tradicional o clásico, varios modelos han sido desarrollados y propuestos para determinar o predecir la vida a fatiga en las mezclas bituminosas. Estos modelos utilizan principalmente ecuaciones basadas en la deformación producto de tensiones de tracción en la base las capas de las mezclas bituminosas (Roque et al., 2002).



El Instituto del Asfalto en el año 1982 desarrolló la siguiente ecuación empírica en base a una mezcla estándar con un 11% de contenido de betún en volumen y un 5% de contenido de huecos.

$$N_f = 0.0796(\varepsilon_t)^{-3.291} (E^*)^{-0.854}$$

(2. 11)

Donde,

N_f : N° de repeticiones admisibles en la mezcla bituminosa

ε_t : Deformación unitaria por tracción en la base de la capa de mezcla bituminosa

E^* : Modulo dinámico de la mezcla bituminosa

Otra expresión desarrollada para calcular el fallo por fatiga en las mezclas bituminosas es la señalada en la ecuación (2. 12), la cual fue propuesta como resultado de un trabajo de investigación llevado a cabo durante el programa SHRP (Sousa et al., 1996).

$$N_f = 2.526 \cdot 10^5 \cdot e^{-0.2007 \cdot V_v} \cdot \varepsilon_0^{-3.4134} \cdot S_0^{-2.1239}$$

(2. 12)

Donde,

N_f : N° de repeticiones admisibles en la mezcla bituminosa

e : Logaritmo de base natural

V_v : Contenido de huecos (porcentaje)

ε_0 : Deformación unitaria por tracción en la mezcla bituminosa

S_0 : Módulo de rigidez en la mezcla (psi)

De acuerdo a los modelos planteados, se observa que diferentes autores mediante sus investigaciones han identificado que son muchas las variables que afectan a la fisuración por fatiga, llegando a obtener leyes de fatiga en las que incorporan propiedades de las mezclas como su módulo de rigidez, contenidos de betún y contenido de huecos, entre otras, lo que demuestra que la estimación de la resistencia de una mezcla frente al fenómeno de fisuración por fatiga no es un parámetro simple de predecir.

Por otra parte, a partir del año 1976 los investigadores Maupin y Freeman realizaron los primeros trabajos que apuntaban a correlacionar para diferentes tipos de mezclas bituminosas los coeficientes K_1 y K_2 de la ley de fatiga, señalada en la ecuación (2. 13).

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)^{K_2}$$

(2. 13)



Más tarde, estas correlaciones también fueron obtenidas por autores como **Carpenter (2006)** y **Pais et al. (2009)**, señalando que la buena correlación existente entre ambas constantes permite predecir la vida a fatiga de las mezclas bituminosas. Sin embargo, este modelo de predicción requiere de igual manera realizar ensayos a fatiga, solo que se requiere realizar menor cantidad de ensayos, los cuales deben ajustarse a las relaciones los coeficientes obtenidos según los modelos establecidos para cada tipo de mezcla, **Fig. 2- 54**.

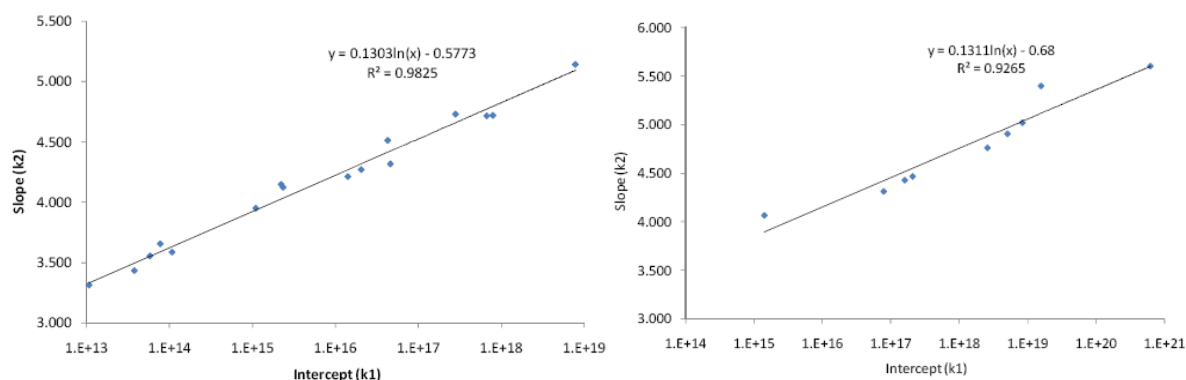


Fig. 2- 54 Correlación entre factores K1 y K2 de la ley de fatiga para mezclas bituminosas utilizadas en capas de base e intermedias.
(Fuente: Pais et al., 2009)

En el año 2006, **Carpenter** presenta una relación que permite obtener por medio de los valores de resistencia a tracción indirecta, el valor de K1 de la ley de fatiga, **Fig. 2- 55**. Esta correlación tiene la finalidad de relacionar los valores de K1 obtenidos con las correlaciones similares a las presentadas por Maupin y Freeman para la obtención del coeficiente K2. El problema radica en que el bajo índice de correlación obtenido no permite tener una predicción confiable.

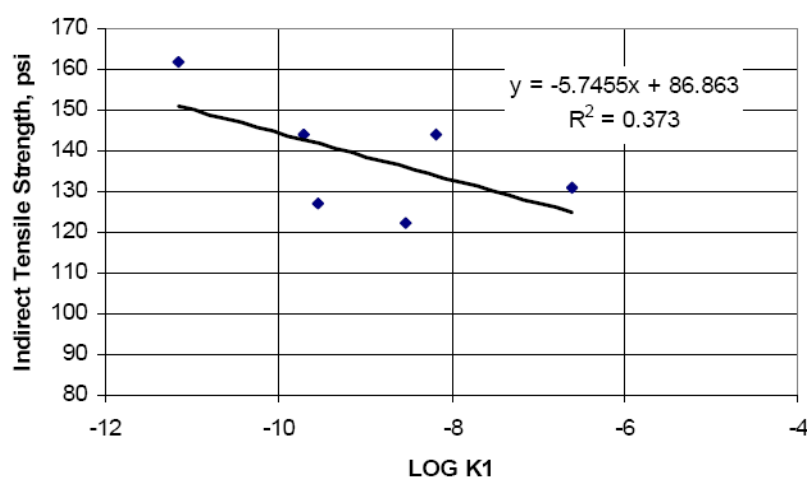


Fig. 2- 55 Correlación entre valores de Resistencia a Tracción Indirecta y constante K1 de la ley de fatiga.
(Fuente: Carpenter, 2006)

Uno de los procedimientos más recientes para predecir la ley de fatiga fue el establecido por Pérez et al. (2005 b). Este procedimiento permite determinar el comportamiento a fatiga y obtener su ley de fatiga empleando el ensayo a tracción directa CTD en su modalidad estática, descrito en este mismo capítulo anteriormente, y se basa en las correlaciones con los resultados de deformación crítica y módulo dinámico, obtenidas en su modalidad dinámica, Fig. 2- 56.

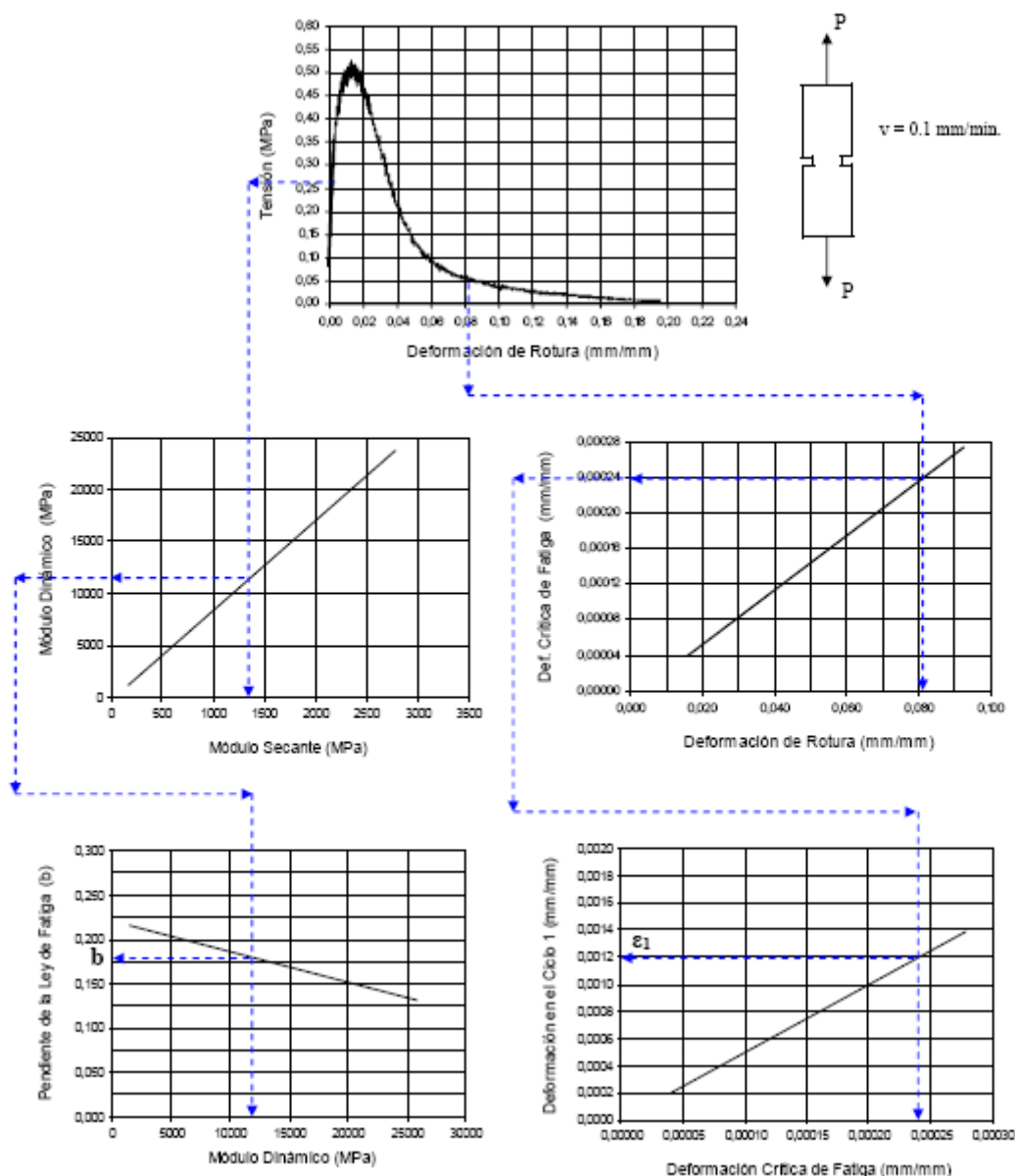


Fig. 2- 56 Nomograma para determinar la ley de fatiga de una mezcla a partir del ensayo CTD
(Fuente: Pérez et al., 2005b)

El procedimiento establecido en el nomograma ilustrado en la Fig. 2- 56 consiste en determinar los parámetros de la ley de fatiga: deformación en el ciclo 1 (ϵ_1) y pendiente de la ley de fatiga (parámetro “b”), señalados en la ecuación (2. 14). En una primera instancia se debe realizar el ensayo a tracción directa CTD con una velocidad de aplicación de carga de 0.1 mm/min. Por



medio de los datos de tensión y deformación obtenidos, se calcula el módulo secante, y a través de este parámetro se obtiene el módulo dinámico, valor con el cual es posible determinar la pendiente de la ley de fatiga (parámetro “b”). Análogamente, se puede determinar la deformación crítica de fatiga a través del parámetro de deformación de rotura obtenido del ensayo CTD en su modalidad estática, y posteriormente mediante el parámetro de deformación crítica de fatiga se obtiene la deformación en el ciclo 1 (ε_1).

$$\log \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right) = -b \cdot \log N$$

(2. 14)

Donde,

N: Número de ciclos de la vida a fatiga

ε_i : Deformación unitaria por tracción

ε_1 : Deformación en el ciclo 1

b : Parámetro de la ley de fatiga



CAPÍTULO 3

Estudios Realizados y Trabajo Experimental



3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detallan los estudios realizados para el desarrollo de esta tesis doctoral, los cuales se enfocaron en dos líneas de investigación.

En una primera etapa, se procedió al desarrollo de un ensayo experimental que fuera capaz de evaluar la resistencia al fallo por fisuración de las mezclas asfálticas utilizadas en el firme. Este procedimiento debía cumplir con la condición de no presentar las desventajas de los actuales procedimientos utilizados, revisados en el estado actual del conocimiento presentado en el capítulo 2 de esta tesis doctoral. En este contexto, se evaluó un nuevo procedimiento, el ensayo Fénix, frente a múltiples variables experimentales, con el objetivo de establecer la pertinencia, repetibilidad y sensibilidad del procedimiento propuesto, para evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas relacionadas con el fallo por fisuración.

Las variables analizadas en esta primera fase fueron:

- Influencia de la velocidad de aplicación de carga y envejecimiento de la mezcla
- Influencia del tipo de betún utilizado y temperatura de ensayo
- Influencia del porcentaje de betún utilizado y temperatura de ensayo
- Influencia de la temperatura de compactación
- Influencia del material reciclado (RAP)

En una segunda etapa, se determinó el comportamiento a fatiga de una serie de mezclas, las cuales fueron ensayadas y caracterizadas también mediante el nuevo procedimiento del ensayo Fénix. La finalidad de esta etapa fue determinar el grado de correlación entre las propiedades mecánicas obtenidas por el nuevo procedimiento desarrollado y sus características a fatiga.

Finalmente, como parte de esta segunda etapa de esta tesis doctoral, se elaboraron instrumentos que permiten seleccionar mezclas resistentes a la fisuración por fatiga, con el objetivo de tener en cuenta esta propiedad en el diseño de la mezcla de una forma sencilla. Estos instrumentos de diseño se realizaron con los parámetros obtenidos del ensayo Fénix de todas las mezclas evaluadas durante la fase experimental.



3.2 METODOLOGÍA

Los procedimientos utilizados para evaluar las características mecánicas de las mezclas bituminosas relacionadas con su resistencia a fisuración fueron: el ensayo Fénix, desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, y cuya validación y análisis se ha llevado a cabo en esta tesis doctoral, y el ensayo de fatiga a flexotracción en tres puntos, recogido en la norma europea UNE-EN 12697-24 (Anexo C).

3.2.1 Ensayo Fénix

El ensayo Fénix nace de la idea de disponer de una metodología que permita evaluar el comportamiento de las mezclas bituminosas frente al deterioro de fisuración, solventando las desventajas de los otros ensayos revisados en la literatura, expuestos en el capítulo anterior. A su vez, debía poseer la particularidad de ser un procedimiento sencillo, fácil de ejecutar y económico. Este ensayo ha sido llamado Fénix, de acuerdo al proyecto de investigación que ha permitido su desarrollo (Proyecto CENIT: Investigación Estratégica de Carreteras más Seguras y Sostenibles, Acrónimo: FÉNIX).

En este punto se presenta detalladamente el procedimiento de ejecución del nuevo procedimiento desarrollado para evaluar la resistencia a fisuración de las mezclas bituminosas, el ensayo Fénix. Además se especifica el equipamiento a utilizar, las condiciones del ensayo, las tensiones generadas y los parámetros que se obtienen como resultado.

3.2.1.1 Objetivos y alcance del ensayo Fénix

El objetivo principal del ensayo Fénix es la determinación de resistencia a la fisuración y tenacidad en las mezclas bituminosas. Con él se puede determinar la resistencia a tracción, la energía disipada en el proceso de fractura, el índice de rigidez a tracción, el índice de tenacidad y desplazamientos de rotura.

El método es aplicable a mezclas densas, semidensas, gruesas y micloaglomerados. Se pueden establecer diferencias entre sus propiedades de fractura y estudiar como influyen los cambios en las características de sus materiales constituyentes, como: granulometrías, ligantes, aditivos y filleres, o la influencia de factores externos como variación de temperatura, susceptibilidad al agua o envejecimiento, en las propiedades mecánicas de estas mezclas.

Una de las principales ventajas de este ensayo es que simula el mecanismo de fisuración de las mezclas bituminosas, mediante su principal modo de propagación de fisura, modo I, cuando éstas son solicitadas, ya sea, mediante esfuerzos térmicos o por cargas de tráfico, permitiendo a su vez, el análisis de la zona de *softening* en su curva carga - desplazamiento. Otra gran ventaja



de este ensayo es la facilidad para realizarlo, tanto sobre probetas fabricadas por el método Marshall o compactador giratorio, como sobre testigos extraídos de obras.

3.2.1.2 Metodología del ensayo Fénix

La metodología del ensayo Fénix consiste en someter media probeta o testigo cilíndrico, cortado por un plano diametral, a un esfuerzo de tracción directa para provocar su fractura, simulando la propagación de una fisura en una capa de mezcla bituminosa del firme.

En el caso de las probetas cilíndricas, en un comienzo, el procedimiento de fabricación y compactación sigue la metodología establecida por el método Marshall de acuerdo a la norma española NLT-159/00, y en el caso de testigos, una vez extraídos éstos, se cortan para obtener unas dimensiones similares a las de una probeta Marshall. Luego, la probeta o testigo se corta por la mitad, por un plano diametral, y se le induce una fisura mediante una entalladura en la parte central, tal como se ilustra en la Fig. 3 - 1.

Posteriormente, mediante el uso de una resina epoxi, se fijan a las dos secciones de la cara plana separadas por la entalladura, unas placas de acero, Fig. 3 - 2. Éstas, a su vez, son fijadas a los soportes de la prensa mediante dos pasadores, que permiten un movimiento de rotación respecto a éstos, de acuerdo a lo ilustrado en la Fig. 3 - 3.

El ensayo Fénix se realiza a temperatura controlada y consiste en someter las probetas semicirculares a un esfuerzo simple de tracción directa. Para ello las probetas o testigos deben estar previamente estabilizadas a la temperatura de ensayo. Para la realización del ensayo se utiliza una prensa MTS que dispone de una cámara ambiental capaz de controlar la temperatura con una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

El ensayo se realiza mediante control de desplazamiento del pistón, aplicando una velocidad a desplazamiento constante hasta llegar a la rotura total de la probeta. En los trabajos experimentales realizados en esta tesis doctoral se analizó el efecto de la velocidad de desplazamiento del pistón con la finalidad de obtener completa la parte de la curva posterior a su resistencia máxima, o sea la parte de relajación o *softening*, y así, simular la abertura lenta de la grieta mediante el modo I de fractura.



Fig. 3 - 1 Fabricación probeta Fénix, corte e inducción de fisura (plano diametral de corte)



Fig. 3 - 2 Fabricación probeta Fénix, pegado de placas metálicas



Fig. 3 - 3 Montaje ensayo Fénix en prensa MTS con cámara ambiental

El software de adquisición de datos de la prensa MTS registra la evolución de la fuerza de tracción aplicada, así como el desplazamiento del pistón hasta que éste alcance un desplazamiento tal, que la carga como mínimo haya caído al valor de 0,1 KN, con la cual el ensayo se da por finalizado.

Una vez registrados los datos por el equipo informático se procede a graficar las cargas registradas en función de sus desplazamientos, y a partir de esto, se obtendrán los parámetros de resistencia a fisuración y tenacidad para cada temperatura de ensayo.

3.2.1.3 Tensiones generadas en el ensayo Fénix

Una de las principales ventajas del ensayo Fénix, es que presenta la particularidad de desarrollar principalmente tensiones de tracción en los alrededores de la fisura, focalizando el trabajo realizado en propagar la fisura a través del plano de fallo previamente inducido, Fig. 3 - 4.

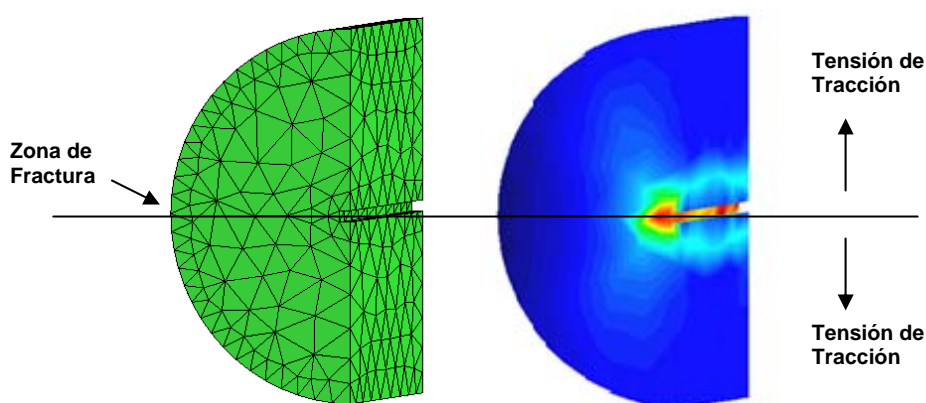


Fig. 3 - 4 Campo tensional a tracción en probeta ensayo Fénix, GID ® Software

El estado de tensional del ensayo de tracción Fénix, considerando un comportamiento elástico del material, se presenta en la Fig. 3 - 5.

Al considerar la aplicación de la carga excéntrica, F , en las placas metálicas que están adheridas a la probeta, se genera un momento flector, M (debido a la excentricidad, e , de la fuerza, F , respecto a un eje de simetría de la sección resistente), además de la fuerza F , ahora aplicada en una línea de acción que pasa por el eje de simetría del área resistente. La Fig. 3 - 6 esquematiza tal situación.

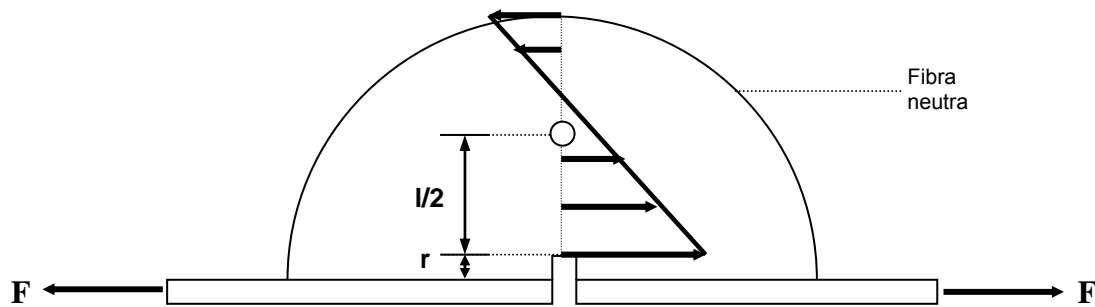


Fig. 3 - 5 Esquema de la probeta. Diagrama de esfuerzos

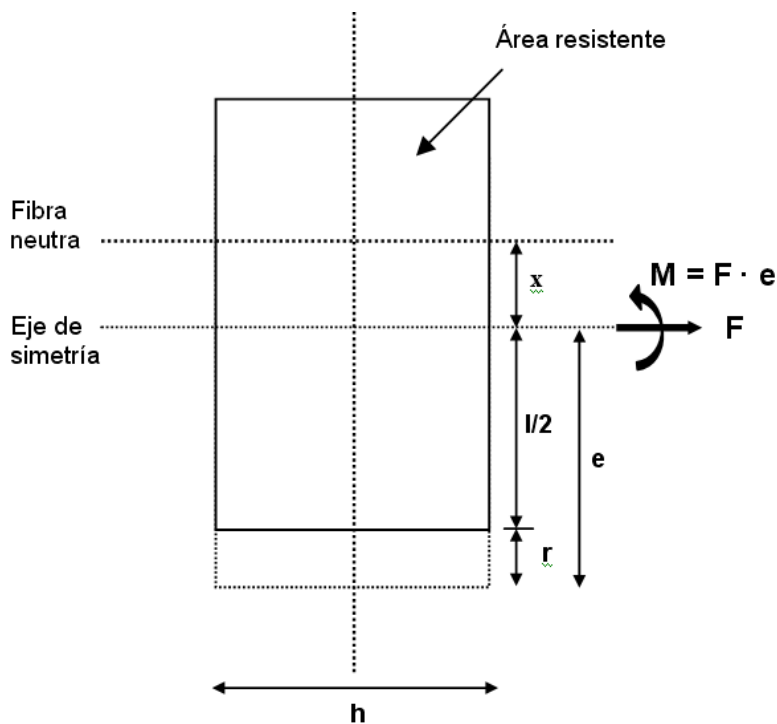


Fig. 3 - 6 Área resistente de la probeta

La distancia “e” se deduce de la Fig. 3 - 6 de acuerdo a las constantes físicas obtenidas de la geometría de la probeta, por lo que la excentricidad “e” se encuentra en función de la longitud de la ranura impuesta, r, y la longitud del área resistente, l, tal como se señala a continuación en la ecuación (3. 1).

$$e = \left(\frac{l}{2} + r \right) \quad (3. 1)$$

Las tensiones producidas en el área resistente de la probeta se presentan a continuación, en las ecuaciones (3. 2) y (3. 3), donde se observan las tensiones producidas por la carga axial, F, y las tensiones producidas por el momento, M, producto de la excentricidad de la carga.



$$\sigma_F = \frac{F}{A} = F \left(\frac{1}{l \cdot h} \right) \quad (3.2)$$

donde:

- σ_F : Esfuerzos debido a carga axial.
 F : Fuerza máxima aplicada.
 A : Área resistente.
 h : espesor de la probeta (m).
 l : Longitud inicial de ligamento (m).

$$\sigma_M = \frac{M}{I_m} \cdot y = \frac{F \cdot \left(\frac{l}{2} + r \right)}{\frac{1}{12} \cdot l^3 \cdot h} \cdot \left(\frac{l}{2} \right) = F \left(\frac{3(l + 2 \cdot r)}{l^2 \cdot h} \right) \quad (3.3)$$

donde:

- σ_M : Esfuerzos debido al momento.
 M : Momento flector.
 I_m : Momento de inercia.
 y : Distancia del eje neutro de las tensiones producidas por el momento M.
 F : Fuerza máxima aplicada.
 r : Longitud de la ranura impuesta en la probeta.

De acuerdo al principio de superposición utilizado en resistencia de materiales se obtienen los esfuerzos totales tal como se señala en la ecuación (3.4).

$$\sigma = \sigma_F + \sigma_M \quad (3.4)$$

donde:

- σ : Esfuerzos totales.
 σ_F : Esfuerzos debido a carga axial.
 σ_M : Esfuerzos debido al momento.

En la Fig. 3 - 7 se presenta un esquema con las tensiones generadas en la probeta del ensayo Fénix, donde se observan las tensiones producto de la carga axial, F, debido al esfuerzo producido por el momento flector, M, y los esfuerzos totales, producto de la suma de ambos esfuerzos.

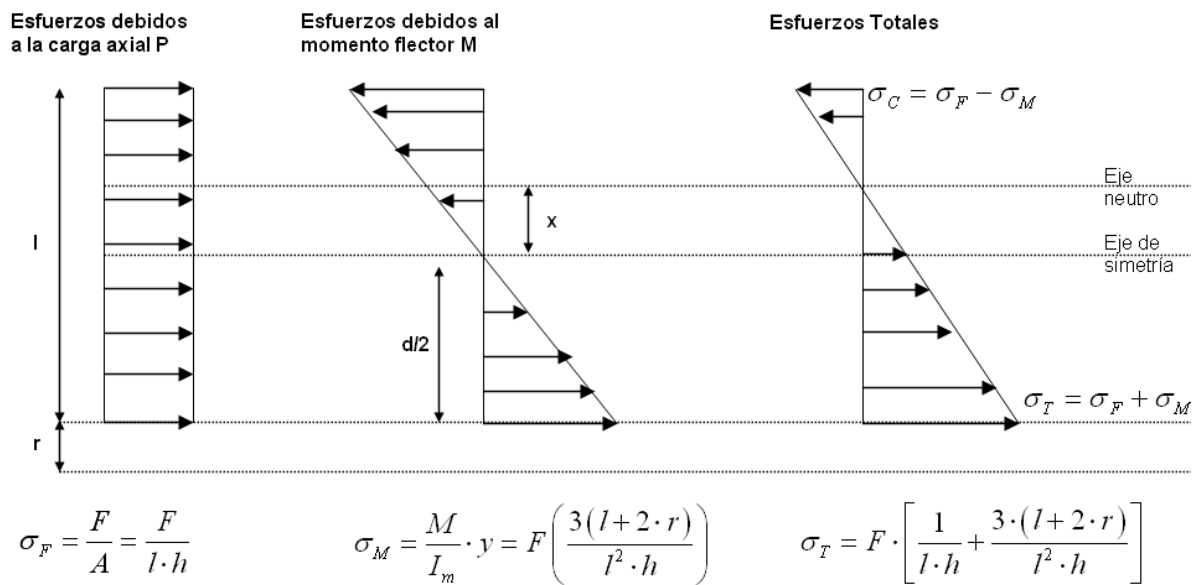


Fig. 3 - 7 Esquema de tensiones producidas en el ensayo Fénix

3.2.1.4 Parámetros resultantes del ensayo Fénix

Mediante los resultados obtenidos del ensayo Fénix, específicamente de su curva carga–desplazamiento (Fig. 3 - 8), se pueden obtener los siguientes parámetros que representan las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas relacionadas con su resistencia al fallo por fisuración.

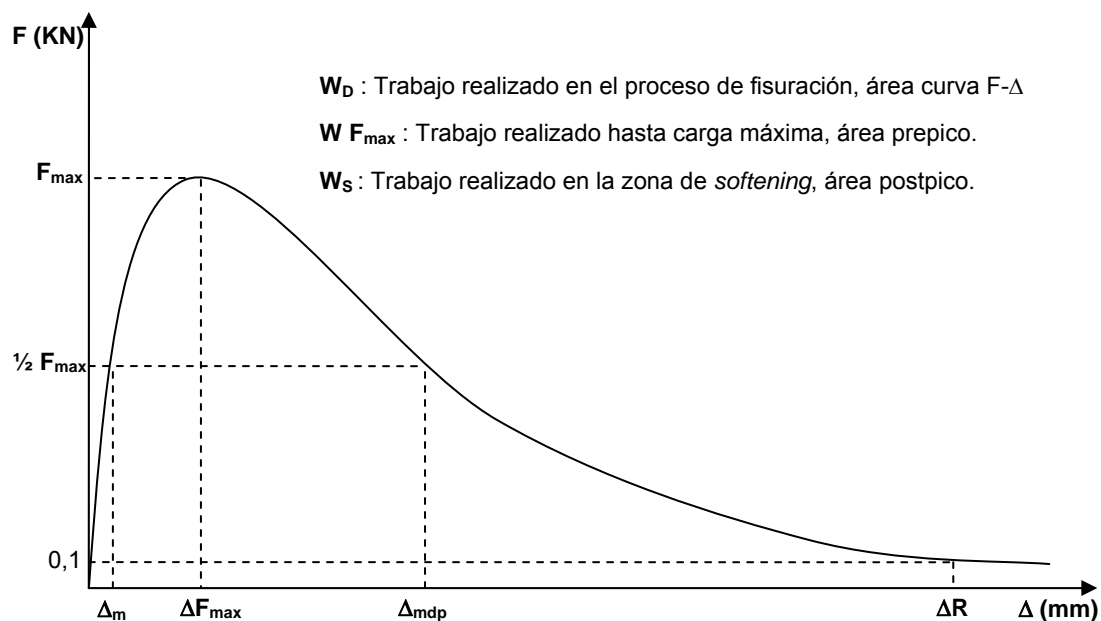


Fig. 3 - 8 Curva carga-desplazamiento ensayo Fénix.



Carga máxima a tracción (F_{\max}): Se define como la carga máxima registrada en el ensayo a tracción directa.

Desplazamiento a carga máxima (ΔF_{\max}): Se define como el desplazamiento realizado por el pistón cuando se registra la carga máxima a tracción.

Resistencia a tracción (R_T): Se ha definido como la relación entre la carga máxima registrada, F_{\max} , y el área de ligamento o fractura. La resistencia a tracción se calcula utilizando la ecuación (3. 5).

$$R_T = \frac{1000 \cdot F_{\max}}{h \cdot l} \quad (3. 5)$$

donde,

R_T : Resistencia a tracción, (MPa)
 F_{\max} : Carga máxima registrada (KN)
 h : espesor de la probeta (mm).
 l : Longitud inicial de ligamento (mm).

Desplazamiento de rotura (Δ_R): Se define como el desplazamiento en el cual la carga ha caído hasta los 0,1 KN. Este parámetro entrega un valor importante, puesto que permite calcular las energías disipadas en el proceso de fractura de las mezclas, y a su vez, permite distinguir entre mezclas con iguales energías disipadas, G_D , diferenciando las más frágiles de las más dúctiles.

Índice de rigidez a tracción (I_{RT}): Se define como la relación entre la mitad de la carga máxima, $\frac{1}{2} F_{\max}$, y el desplazamiento correspondiente a ese valor de carga antes de la carga máxima, Δ_m . Este índice indica una pseudo-rigidez del material, mostrando que tan flexible o rígida es la mezcla bituminosa evaluada. A mayor índice de rigidez a tracción, menos flexible es la mezcla. El índice de rigidez de tracción se calcula de acuerdo a la ecuación (3. 6).

$$I_{RT} = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{\max}}{\Delta_m} \quad (3. 6)$$

donde,

I_{RT} : Índice de rigidez a tracción (KN/mm)
 F_{\max} : Carga máxima registrada (KN)
 Δ_m : Desplazamiento antes de la carga máxima a $\frac{1}{2} F_{\max}$ (mm).



Desplazamiento al 50% Fmax postpico, (Δ_{mdp}): Se define como el desplazamiento registrado por la mezcla una vez que la carga ha caído a la mitad del valor de su carga máxima. Este parámetro indica la capacidad que tiene la mezcla evaluada de admitir deformación, puesto que a medida que las mezclas son más dúctiles, y por ende más deformables, se obtienen mayores valores de Δ_{mdp} , mientras que para mezclas más frágiles se obtienen menores valores de Δ_{mdp} .

Energía disipada por unidad de superficie (G_D): Se define como el trabajo total realizado en el proceso de fisuración, W_D , dividido entre el área de ligamento o fractura, perpendicular a la fuerza aplicada. El cálculo del trabajo realizado se efectúa mediante la ecuación (3. 7) y la energía disipada en el proceso de fisuración se calcula de acuerdo a la ecuación (3. 8).

$$W_D = \sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i) \cdot (y_i) + 0.5 \cdot (x_{i+1} - x_i) \cdot (y_{i+1} - y_i) \quad (3. 7)$$

donde:

- W_D : Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo curva carga – desplazamiento (KN-mm).
 x_i : Desplazamiento registrado (mm).
 y_i : Carga registrada (mm).
 n : Punto en que la carga ha descendido a 0,1 KN.

$$G_D = \frac{W_D}{h \cdot l} \quad (3. 8)$$

donde:

- G_D : Energía disipada por unidad de superficie en el proceso de fisuración (J/m²).
 W_D : Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo curva carga – desplazamiento (KN · mm).
 h : Espesor de la probeta (m).
 l : Longitud inicial de ligamento (m).

Índice de energía (I_E): Se define como la energía disipada en el periodo de relajación o *softening* ponderada por la razón de su proporción respecto del total de la energía disipada en el proceso de fisuración. Este índice tiene la finalidad de evaluar la cantidad de energía disipada por el material una vez que éste ya ha alcanzado su resistencia máxima, ponderando las mezclas que sean capaces de disipar mayor energía en su fase de *softening*, respecto de la disipada en su fase de carga inicial hasta la carga máxima. Por tanto, para igualdad de valores de energía disipada en la fase de *softening*, este parámetro aumenta en las mezclas más



dúctiles respecto de las más frágiles, puesto que su razón de proporción respecto del total de la energía disipada, será mayor. Su expresión de cálculo se observa en la ecuación (3. 9) y sus variables se muestran mediante la Fig. 3 - 8.

$$I_E = \frac{W_S}{h \cdot l} \cdot \left(\frac{W_S}{W_D} \right) \quad (3. 9)$$

donde,

- I_E : Índice de energía (J/m^2).
 W_S : Trabajo realizado en la zona de *softening*, postpico ($KN \cdot mm$).
 W_D : Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo curva carga – desplazamiento ($KN \cdot mm$).
 h : Espesor de la probeta (m).
 l : Longitud inicial de ligamento (m).

Índice de tenacidad (IT, $(J/m^2) \cdot mm$): Se define como la energía disipada en el periodo de relajación o *softening* multiplicada por un factor de fragilidad, el cual corresponde al desplazamiento realizado desde la carga máxima, F_{max} , hasta que la carga ha caído a la mitad de su valor máximo. Este índice tiene la finalidad de evaluar la tenacidad de la mezcla bituminosa, considerándose ésta como la capacidad de la mezcla de mantener unidos sus componentes una vez que ya ha alcanzado su resistencia máxima. Por tanto, a medida que este parámetro aumenta, la mezcla es más tenaz, y por otra parte, a medida que este factor disminuye, la mezcla tiene un comportamiento más frágil. Su expresión de cálculo se observa en la ecuación (3. 10) y sus variables se muestran mediante la Fig. 3 - 8.

$$I_T = \frac{W_D - W_{Fmax}}{h \cdot l} \cdot (\Delta_{mdp} - \Delta_{Fmax}) \quad (3. 10)$$

donde,

- I_T : Índice de tenacidad $((J/m^2) \cdot mm)$.
 W_D : Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo curva carga – desplazamiento ($KN \cdot mm$).
 W_{Fmax} : Trabajo realizado hasta carga máxima ($KN \cdot mm$).
 Δ_{Fmax} : Desplazamiento a F_{max} (mm).
 Δ_{mdp} : Desplazamiento a $\frac{1}{2} F_{max}$ post pico (mm).
 h : Espesor de la probeta (m).
 l : Longitud inicial de ligamento (m).



3.2.2 Ensayo a fatiga a flexotracción dinámica en tres puntos, UNE-EN 12697-24.

Este procedimiento se encuentra recogido en la actual normativa europea UNE-EN 12697-24 en el anexo C. Este método caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas sometidas a una carga cíclica, en un ensayo de fatiga por flexión en tres puntos, utilizando probetas prismáticas.

3.2.2.1 Objetivos y alcance del ensayo a fatiga

El objetivo principal del ensayo a fatiga en flexotracción dinámica en tres puntos es determinar el número de ciclos que soporta una probeta de mezcla bituminosa frente a la aplicación de una carga cíclica con control de desplazamiento, la cual produce una deformación en la probeta hasta su fallo. Consecuentemente, mediante el ensayo de una serie de probetas a diferentes amplitudes de desplazamiento, se obtiene la ley de fatiga en deformación.

3.2.2.2 Metodología del ensayo a fatiga

El ensayo consiste en someter una probeta prismática, apoyada en sus extremos y sujeta en su centro, a un desplazamiento de éste que varía con el tiempo según la siguiente función sinusoidal:

$$D_c = D_0 \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (3.11)$$

Donde,

- D_c : Desplazamiento en el instante i , en micras (μm).
- $2 D_0$: Amplitud total de la función de desplazamiento, en micras (μm).
- f : Frecuencia de la onda, en Hertz (Hz).
- t : Tiempo en segundos (s).

Relacionando las deformaciones máximas iniciales producidas en el centro de la probeta, con el número de ciclos necesarios para reducir la rigidez de la probeta a la mitad, se obtienen pares de valores correspondientes a varios ensayos a diferentes amplitudes de desplazamiento, que permiten definir la ley de fatiga en deformación con control en desplazamiento.

Las probetas se obtienen a partir de los aparatos y el procedimiento descrito en la norma NLT-173. Dicha norma, establece la fabricación de probetas, de dimensiones aproximadas 300 x 300 x 50mm., compactadas por vibración. Por serrado de las mismas se obtendrán cinco probetas prismáticas de cada una, con unas dimensiones de 300 x 50 x 50 mm, tal como se ilustra en la Fig. 3 - 9.



Fig. 3 - 9 Preparación de las probetas para el ensayo de fatiga en flexotracción dinámica

Una vez obtenidas las probetas, se pegan trozos de tubo metálico cuadrado, con la finalidad de fijar la probeta al aparato de apoyo. De acuerdo a la Fig. 3 - 10, uno de los trozos se pega en una de las caras serradas de la probeta, de forma que su centro equidiste de los extremos de la misma, y en la otra cara serrada se pegan otros dos tubos, de forma que la distancia entre sus centros permita situarlos sobre los apoyos simples del equipo de prensa, y que dicho centro equidiste del centro del tubo pegado en la otra cara.



Fig. 3 - 10 Probeta para el ensayo de fatiga en flexotracción dinámica

El extensómetro se fija en la cara de la probeta que tiene pegados los dos tubos metálicos y se sitúa en el centro geométrico de esta cara, Fig. 3 - 10. El montaje se realiza en el interior de la cámara ambiental. Terminado el montaje se espera el tiempo necesario para que todos los elementos de apoyo, extensómetro y probeta, recuperen la temperatura de ensayo de 20 ± 1 °C.

Luego, una vez realizado el montaje de la probeta y del extensómetro, y conseguida la temperatura de ensayo, se procede a aplicar al émbolo un desplazamiento que varía con el



tiempo según la función sinusoidal, ya definida, con una frecuencia de 10 Hz, variando el valor de la amplitud en cada ensayo.

Esta sollicitación se mantiene hasta que se cumpla la condición de fin de ensayo. El registro de las funciones de carga, extensométrica y desplazamiento se realiza a través del equipo de adquisición de datos cada 500 ciclos, comenzando la adquisición de datos en el ciclo 200. Así en los ciclos 200, 700, 1200, 1700, etc., se registran los valores de las funciones a lo largo de un ciclo completo, a partir de la lectura de más de 50 puntos equidistantes en el tiempo.

Se considera finalizado el ensayo en el ciclo N, si el valor de la amplitud cíclica de la carga calculada para el ciclo N es menor o igual a la mitad del valor de la amplitud cíclica de la carga calculada para el ciclo 200. El ensayo se considera válido si el N obtenido está comprendido entre 6200 y 600200 ciclos.

3.2.2.3 Parámetros resultantes del ensayo de fatiga a flexotracción dinámica

Función de tensión, σ : El estado tensional de la mezcla bituminosa se caracteriza por la tensión que se produce en un punto situado en el centro geométrico de la cara en que se encuentran los dos apoyos. Esta tensión actúa normalmente a un plano perpendicular al plano de la cara de apoyo.

La tensión se determina para cada ciclo, a partir de la función de carga registrada y de las dimensiones de la probeta y distancia entre apoyos según la ecuación (3. 12).

$$\sigma = P \cdot \frac{3(L-20)}{2(b \cdot e^2)} \quad (3. 12)$$

donde,

- σ : Esfuerzo instantáneo, en megapascuales (MPa).
- P : Carga instantánea, en Newton (N).
- L : Distancia entre soportes, en milímetros (mm).
- b : Ancho de la probeta, en milímetros (mm).
- e : Espesor de la probeta, en milímetros (mm).

Función deformación, ε : El estado de deformaciones de la probeta se caracteriza por la deformación que se produce en el mismo punto en que se define la tensión y según la normal al mismo plano mencionado. La deformación se debe determinar en cada ciclo aplicando la ecuación (3. 13).



$$\varepsilon = \frac{2 \text{Ext} \cdot (L - 20)}{2B \cdot L - B^2 - 400} \quad (3.13)$$

donde,

- ε : Deformación instantánea.
 Ext : Señal instantánea del extensómetro, en milímetros (mm).
 B : Base de medición del extensómetro, en milímetros (mm).
 L : Distancia entre los soportes, en milímetros (mm).

Modulo dinámico, MD: El módulo dinámico en un determinado ciclo se define como el cociente entre la amplitud cíclica de la función tensión y la amplitud cíclica de la función deformación. La amplitud cíclica de una función en un ciclo es el valor absoluto de la diferencia entre su valor máximo y su valor mínimo en ese ciclo. Este parámetro se calcula mediante la ecuación (3.14).

$$MD = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} \quad (3.14)$$

donde,

- MD : Módulo dinámico, en megapascuales (MPa).
 σ_c : Amplitud cíclica del esfuerzo, en megapascuales (MPa).
 ε_c : Amplitud cíclica de la deformación.

Angulo de desfase, ϕ : se define como el desfase existente entre las funciones de tensión y deformación. Su expresión se calcula de según la ecuación (3.15).

$$\phi = (B_\varepsilon - B_t) \frac{180}{\pi} \quad (3.15)$$

donde,

- ϕ = Ángulo de desfase en grados sexagesimales.
 B_ε y B_t = Ángulo de fase de las funciones tensión y deformación aproximadas, en radianes

Ley de fatiga: Para la obtención de la ley de fatiga se consideran los pares de valores: mitad de la amplitud cíclica de la función de deformación en el ciclo número 200, $\frac{1}{2}[\varepsilon_c(200)]$, y el número



total de ciclos aplicados (N). Luego, mediante una aproximación por mínimos cuadrados se obtiene la ley de fatiga, de acuerdo a la ecuación (3. 16).

$$\text{Ley de fatiga de deformación} \quad \varepsilon = a \cdot N^b \quad (3. 16)$$

donde,

ε : Mitad de la amplitud cíclica de la función de deformación en el ciclo número 200 (adimensional).

N : Número total de ciclos aplicados.

a, b : Coeficientes de la ley de fatiga en deformación (adimensionales).

3.3 PLAN DE TRABAJO EXPERIMENTAL

El plan de trabajo experimental se desarrolló en dos fases. Una primera fase cuyo objetivo principal fue validar el procedimiento del ensayo Fénix, y una segunda fase en la cual se realizó un estudio de las propiedades de mezclas bituminosas frente al fallo por fatiga, con la finalidad de analizar su posible correlación con los resultados de los parámetros obtenidos mediante el ensayo Fénix.

Los objetivos específicos de la primera fase experimental fueron los siguientes:

- *Determinar la velocidad de aplicación de carga.* Para ello, se evaluó el procedimiento del ensayo Fénix a distintas velocidades de aplicación de carga, en mezclas envejecidas y sin envejecer, con el objetivo de establecer su valor en función de las respuestas mecánicas obtenidas.
- *Detectar la sensibilidad y repetibilidad.* Para ello, se evaluaron distintos tipos de mezclas mediante el procedimiento del ensayo Fénix, con la finalidad de detectar la sensibilidad y repetibilidad del procedimiento frente a la variación en la composición de la mezcla. En este punto las variables contempladas fueron: temperatura de ensayo, diferentes tipos y contenidos de betún, influencia de la temperatura de compactación y contenido de RAP en la composición de la mezcla.

Los objetivos específicos de la segunda fase experimental fueron los siguientes:

- *Analizar el comportamiento a fatiga y la respuesta mecánica frente al ensayo Fénix de mezclas de igual composición ensayadas a diferentes temperaturas.*
- *Establecer una posible correlación entre las propiedades mecánicas de las mezclas determinadas por ambos procedimientos, el ensayo Fénix y el ensayo de fatiga.*



- *Establecer nuevos instrumentos que puedan ser aplicados al diseño de mezclas resistentes al fallo de fisuración por fatiga.*

3.3.1 Primera fase experimental: Validación del ensayo Fénix

El plan de trabajo propuesto para la primera fase experimental, consistió en el desarrollo y validación del ensayo Fénix. Para ello, se realizaron las siguientes actividades:

- Se analizó la respuesta del ensayo al variar la velocidad de desplazamiento, con objeto de seleccionar la velocidad idónea para el procedimiento propuesto.
- Se analizó la sensibilidad y repetibilidad del ensayo para detectar las diferencias en el comportamiento de mezclas:
 - Fabricadas con diferentes tipos de betunes
 - Ensayadas a diferentes temperaturas
 - Fabricadas con diferentes contenidos de betún
 - Compactadas a diferentes temperaturas
 - Fabricadas con diferentes contenidos de material reciclado

En los ensayos realizados en esta etapa experimental se utilizaron diferentes tipos de mezclas y betunes, los cuales, junto a las variables analizadas, están indicados en la Fig. 3 - 11.

EVALUACIÓN A LA FISURACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS ENSAYO FENIX		
VARIABLES ANALIZADAS	VEL. DE APLICACIÓN DE CARGA Y ENVEJECIMIENTO MEZCLA S-12	0,1 – 1,0 – 10 (mm/seg) B60/70
	TIPO DE BETÚN MEZCLA S-20 (4,3% b s/a)	B60/70 - B40/50 B13/22 - BM3c
	TEMPERATURA DE ENSAYO MEZCLAS S-20 Y G-20	-10, 5 y 20 (°C)
	PORCENTAJE DE BETÚN MEZCLA G-20	3,5 – 4,5 – 5,5 (% b s/a) B60/70 - B40/50 - B13/22
	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA S-20	120, 135, 155 (°C)
	RAP MEZCLAS S-12 Y S-20	40 – 60 (%)

Fig. 3 - 11 Variables analizadas en el desarrollo del ensayo Fénix



Para establecer los niveles la repetibilidad del ensayo Fénix se realizó un estudio estadístico consistente en el análisis de los valores de los coeficientes de variación de los principales parámetros obtenidos de las mezclas empleadas en esta fase experimental. Paralelamente, para establecer la sensibilidad del nuevo procedimiento propuesto, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de los principales parámetros obtenidos de mezclas ensayadas en esta fase experimental por el ensayo Fénix.

3.3.2 Segunda fase experimental: Comportamiento a fatiga de las mezclas

El plan de trabajo propuesto para la segunda fase experimental, consistió en el estudio del comportamiento a fatiga de una serie de mezclas bituminosas, dentro de las cuales algunas fueron diseñadas para tener un buen comportamiento a fatiga, mientras que otras un comportamiento convencional. En esta fase se utilizó el ensayo a fatiga por flexotracción dinámica, ya descrito en un punto anterior. Las mezclas bituminosas convencionales utilizadas en esta fase fueron del tipo G-20 y S-20. A su vez, se evaluó el comportamiento de mezclas recicladas, tipo S-12 y S-20 con tasas de RAP de un 40 y 60%, respectivamente. Las temperaturas de ensayo utilizadas fueron 20 y 5 °C. En la **Tabla 3- 1** se observa un esquema de las variables analizadas. En esta fase experimental se contempló el ensayo de las mismas mezclas señaladas en la **Tabla 3- 1** mediante el ensayo Fénix, en las mismas condiciones de temperatura.

Tabla 3- 1 Variable analizadas en ensayo de fatiga a flexotracción

Tipo de Mezcla	Contenido de Betún (%) s/a	Tipo de betún utilizado	Temperatura de ensayo (°C)
S-20	5	B60/70 B13/22	20 y 5
G-20	5	B60/70 B13/22	20 y 5
S-20 R60	4.4	Penetración 250 dm	20
S-12 R40	4.5	Penetración 200 dm	20

3.3.3 Materiales empleados

- **Betunes**

Como se ha señalado en los puntos anteriores, para la fabricación de las probetas de ensayo de las mezclas convencionales se han empleado cuatro tipos de ligantes, tres convencionales y uno modificado, todos considerados en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, PG-3. Las características de cada uno de los ligantes utilizados se recogen en la **Tabla 3- 2**.



Tabla 3- 2 Propiedades de los betunes empleados en las fases experimentales de la investigación

Características del betún	Unidad	B13/22	B40/50	B60/70	BM-3c
Penetración (25 °C; 100 g; 5s)	0.1 mm	17	43	64	58
Índice de penetración	-	0.1	-0.2	-0.2	2.8
Punto de reblandecimiento anillo y bola	°C	67.3	55.9	51.7	67.4
Punto de fragilidad Fraass	°C	-5	-12	-17	-20
Ductilidad a 25 °C	cm	15	>100	>100	-
Viscosidad dinámica 60 °C	(Pa.s)	4551	651	367	-
Viscosidad dinámica 135 °C	(Pa.s)	1.92	0.72	0.56	2.37
Recuperación elástica a 13 °C	%	-	-	-	74
Residuo RTFOT					
Pérdida de masa	%	0.35	0.4	0.5	0.6
Penetración (25 °C; 100 g; 5s)	% p.o.	10	23	32	40
Incremento en el punto de reblandecimiento	°C	7.5	9.5	9.6	3.7
Ductilidad a 25 °C	cm	7	18	50	-

Los betunes empleados en las mezclas recicladas S-20 R60 y S-12 R40, fueron fabricados con rejuvenecedores y sus penetraciones fueron de 250 y 200 (dm), respectivamente. A su vez, el betún extraído del RAP empleado en estas mezclas, presentaban las siguientes características:

Penetración del betún extraído (dmm)	5
Punto de reblandecimiento del betún envejecido (°C)	87
Asfaltenos (%)	44.62

- **Áridos**

En las fases experimentales de esta investigación, para la fabricación de las mezclas convencionales, se utilizaron áridos de origen calizo provenientes de la cantera de Foj, ubicada en las cercanías de Vallirana, a un lado de la carretera nacional N-340, en la comarca del Baix Llobregat, al oeste de la ciudad de Barcelona, Fig. 3 - 12.



Fig. 3 - 12 Ubicación de la cantera de áridos Foj

Las características físicas de los áridos empleados en las mezclas convencionales ensayadas en las fases experimentales de la investigación se presentan en la **Tabla 3- 3**, y el filler utilizado fue de origen natural.

Tabla 3- 3 Propiedades del árido utilizado

Propiedades	Árido
Naturaleza	Calizo
Procedencia	Cantera de áridos Foj
Densidad (gr/cm ³)	2,7
Desgaste de los ángeles (%)	24
Índice de lajas (%)	15
Porcentaje de caras fracturadas (%)	100

• Granulometrías

Las curvas granulométricas de las mezclas convencionales S-12, S-20 y G-20, utilizadas en el estudio de la primera fase experimental se observan en las **Fig. 3 - 13**, **Fig. 3 - 14** y **Fig. 3 - 15**, mientras que los valores de las granulometrías se registran en la **Tabla 3- 4**. En la segunda fase experimental se utilizaron las mismas granulometrías de las mezclas convencionales S-20 y G-20, utilizadas en la primera fase experimental.

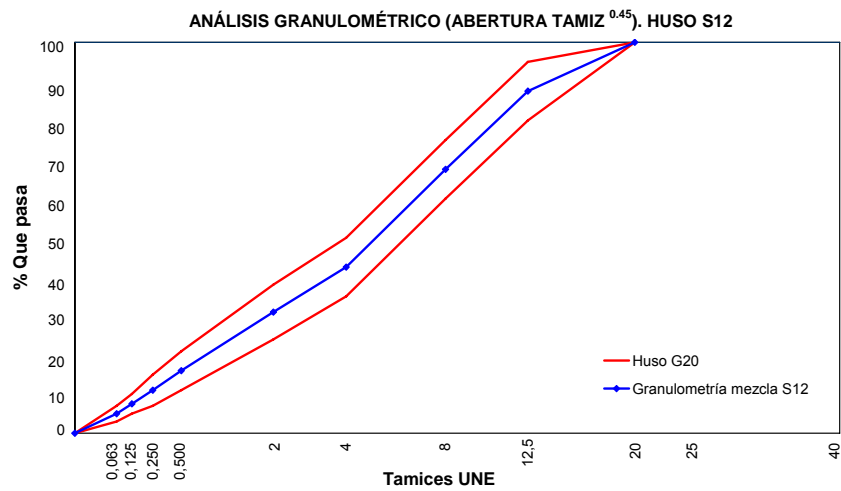


Fig. 3 - 13 Curva granulométrica mezcla S-12

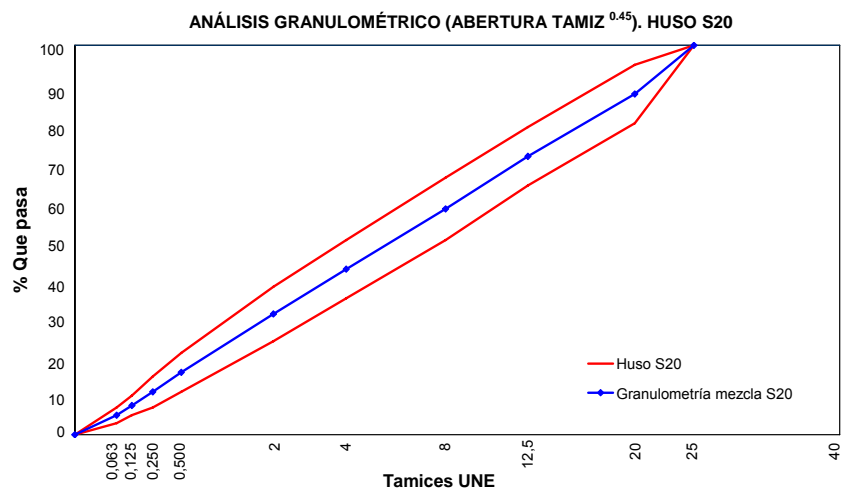


Fig. 3 - 14 Curva granulométrica mezcla S-20

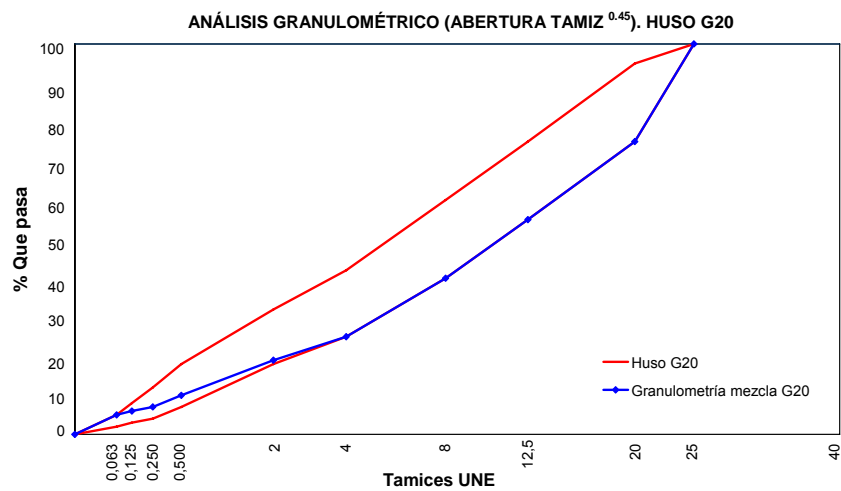


Fig. 3 - 15 Curva granulométrica mezcla G-20



Tabla 3- 4 Granulometrías de mezclas convencionales utilizadas en el estudio experimental

Tamaño Tamiz UNE	Mezcla S-12			Mezcla S-20			Mezcla G-20		
	Huso inf.	Huso sup.	PASA (%)	Huso inf.	Huso sup.	PASA (%)	Huso inf.	Huso sup.	PASA (%)
25	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	80	95	87,5	75	95	75
12,5	80	95	87,5	64	79	71,5	55	75	55
8	60	75	67,5	50	66	58	40	60	40
4	35	50	42,5	35	50	42,5	25	42	25
2	24	38	31	24	38	31	18	32	19
0,5	11	21	16	11	21	16	7	18	10
0,25	7	15	11	7	15	11	4	12	7
0,125	5	10	7,5	5	10	7,5	3	8	6
0,063	3	7	5	3	7	5	2	5	5

Las mezclas recicladas evaluadas tanto en la primera como en la segunda fase experimental de esta tesis doctoral, correspondieron a las mezclas S-12 R40 y S-20 R60. El RAP utilizado en estas mezclas fue empleado en dos fracciones, cuyas características granulométricas tras la extracción del ligante están señaladas en la Tabla 3- 5.

Tabla 3- 5 Granulometría del RAP tras extracción del ligante

Tamaño Tamiz UNE	Granulometría del RAP tras la extracción	
	RAP 8/25	RAP 0/8
Contenido de betún s/m	3,2	5,7
25	100	100
20	96	100
12,5	77	100
8	59	99
4	35	91
2	24	67
0,5	14	33
0,25	9	21
0,125	8	15
0,063	4,6	8,8

En la composición de áridos de las mezcla reciclada S-12 R40 se utilizó un 20% de RAP de la fracción 0/8 y un 20% de RAP de la fracción 8/25, mientras que para la mezcla reciclada S-20 R60 se utilizó un 15% de la fracción 0/8 y un 45% de la fracción 8/25.



Las granulometrías utilizadas en las mezclas recicladas S-12 R40 y S-20 R60, se observan en la Fig. 3 - 16 y Fig. 3 - 17, respectivamente, mientras que los valores de las granulometrías se presentan en la Tabla 3- 6.

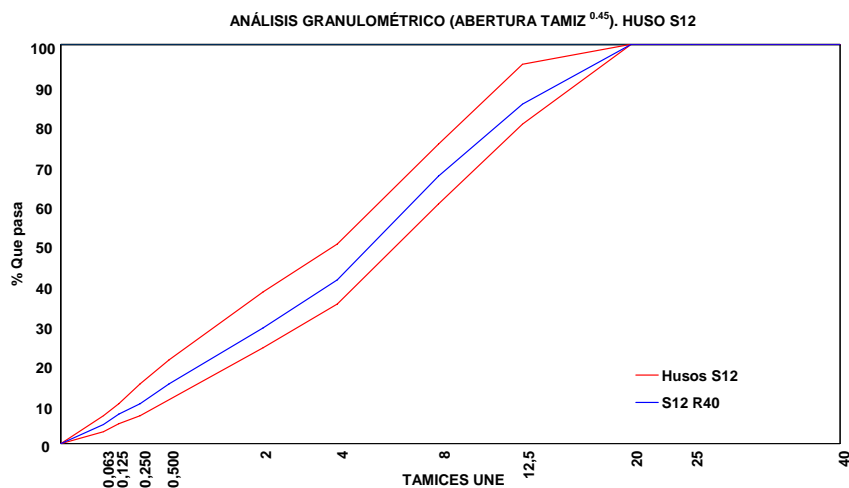


Fig. 3 - 16 Huso granulométrico S-12 y granulometría fórmula de trabajo mezcla S-12 R40

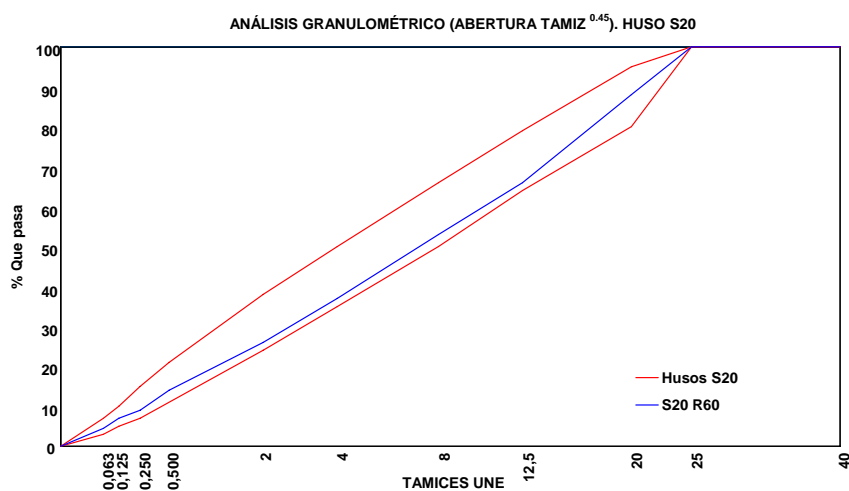


Fig. 3 - 17 Huso granulométrico S-20 y granulometría fórmula de trabajo mezcla S-20 R60



Tabla 3- 6 Granulometría de las mezclas recicladas S-12 R40 y S-20 R60

Tamaño Tamiz UNE	S-12 R40	S-20 R60
25	100	100
20	99	88
12,5	85	66
8	67	53
4	41	37
2	29	26
0,5	15	14
0,25	10	9
0,125	7,4	7
0,063	4,8	4,5



CAPÍTULO 4

Validación del Ensayo Fénix

Análisis de Resultados



4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos en la campaña experimental destinada a validar el ensayo Fénix como un procedimiento eficiente para caracterizar las mezclas bituminosas en relación a su resistencia al fallo por fisuración.

En una primera instancia, se ha evaluado la respuesta de una mezcla bituminosa frente a la velocidad de aplicación de carga, tanto a probetas envejecidas como sin envejecer, con la finalidad de establecer un valor de velocidad de aplicación de carga para la ejecución del ensayo Fénix, que permita determinar las propiedades mecánicas de las mezcla por medio del cálculo de los parámetros ya definidos en el capítulo anterior. Posteriormente, para la validación del procedimiento del ensayo Fénix, se evaluó su sensibilidad frente a las variables de temperatura de ensayo y composición de la mezcla, mediante la aplicación del nuevo procedimiento a mezclas que variaron en: tipo y contenido de betún, temperatura de compactación, y finalmente otras fabricadas con altas tasas de RAP.

En esta primera etapa experimental destinada a la validación del ensayo Fénix, se han ensayado tres tipos de mezclas, dos semidensas, tipo S-12 y S-20, y una mezcla gruesa tipo G-20. Sobre la mezcla S-12 se evaluó la influencia de la velocidad de carga aplicada en el ensayo y el envejecimiento, mientras que sobre la mezcla S-20 se evaluó la influencia del tipo de betún utilizado y la temperatura de ensayo. En la mezcla G-20 se evaluó la influencia del contenido de ligante junto a la temperatura de ensayo.

A su vez, a probetas enviadas al Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña para su análisis, se les evaluó la influencia del RAP en mezclas semidensas del tipo S-12 y S-20, y la temperatura de compactación en mezclas tipo S-20.

En la sección final de este capítulo se presentan los resultados de un estudio estadístico realizado para determinar el grado de repetibilidad y sensibilidad de los parámetros más representativos obtenidos del ensayo Fénix.

4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

4.3.1 Influencia de la velocidad de aplicación de carga

En la Fig. 4 - 1 se muestra la variación del comportamiento mecánico de la mezcla S-12 evaluada mediante el ensayo Fénix a una temperatura de 20 °C. En esta gráfica se puede observar que a medida que se incrementa la velocidad de desplazamiento del pistón de carga, la mezcla

presenta un comportamiento más rígido, y para bajas velocidades de aplicación de carga, ésta presenta un comportamiento más dúctil.

A su vez, en la Fig. 4 - 1 se presentan los parámetros mecánicos evaluados, en los cuales se observa que a medida que se incrementa la velocidad de desplazamiento, los parámetros de carga máxima, F_{max} , índice de rigidez a tracción, I_{RT} , energía disipada, G_D , e índices de energía y tenacidad, I_E e I_T , incrementan sus valores, mostrando que la mezcla evaluada exhibe un comportamiento más tenaz y resistente, a la temperatura de ensayo de 20 °C. Sin embargo, pierde capacidad de deformación, al disminuir el parámetro del desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} . A su vez, se observa que a medida que aumenta la velocidad de aplicación de carga, el comportamiento de la mezcla es cada vez más rígido, y aunque los índices de energía y tenacidad aumentan con la velocidad, su relación con la energía disipada (I_E/G_D y I_T/G_D) disminuye con la velocidad más alta.

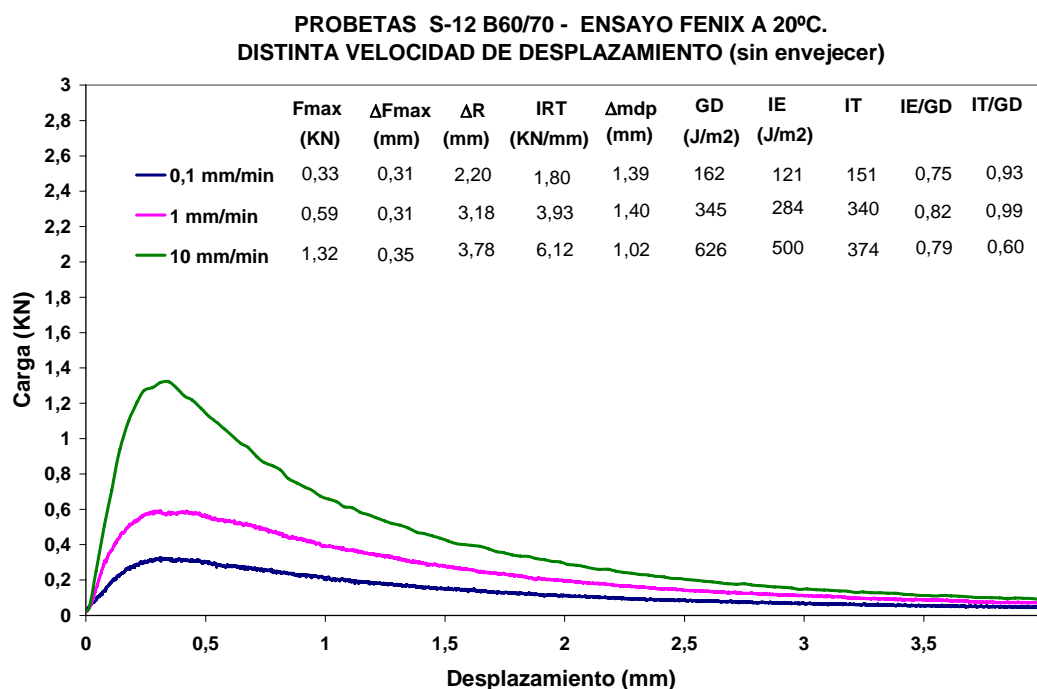


Fig. 4 - 1 Curvas carga – desplazamiento mezcla S-12 a distintas velocidades a aplicación de carga

4.3.2 Influencia del envejecimiento

Con la finalidad de evaluar el comportamiento de las mezclas bituminosas a lo largo del tiempo, se procedió a envejecer probetas de la mezcla S-12 mediante un método establecido en el programa SHRP, que simula el envejecimiento a largo plazo sufrido por una mezcla bituminosa producto de su fabricación y transcurrido un tiempo de puesta en servicio equivalente a 5 años (Kandhal y Chakraborty, 1996). El procedimiento de envejecimiento consiste en colocar las probetas

en un horno mediante la aplicación de aire forzado por 4 días a 80 °C antes de ensayarlas, Fig. 4 - 2. Las probetas fueron ensayadas a las mismas velocidades de desplazamiento que en el punto anterior, es decir, 0.1, 1 y 10 mm/min., y los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 4 - 3.



Fig. 4 - 2 Proceso de envejecimiento de probetas establecido por SHRP

Al analizar los resultados obtenidos, registrados en la Fig. 4 - 1 y Fig. 4 - 3, se observa que las mezclas envejecidas presentan un claro aumento de la rigidez de la mezcla (I_{RT}) para cada velocidad de desplazamiento empleada, junto con una pérdida de tenacidad, puesto que los valores calculados del índice de tenacidad, I_T , disminuyen en las probetas envejecidas. A su vez, se observa una pérdida de capacidad de deformación de la mezcla ya que el desplazamiento de rotura, Δ_R , y desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , disminuyen para cada velocidad de aplicación de carga evaluada. Al analizar la relación entre los índices de energía y tenacidad con la energía disipada se observa que los menores valores se encuentran para la velocidad más baja, mientras que para las velocidades de 1 y 10 mm/min sus valores son iguales.

En función de los resultados obtenidos, tanto para las mezclas envejecidas como sin envejecer, evaluadas a distintas velocidades de aplicación de carga, se ha decidido emplear la velocidad de 1 mm/min. Esta velocidad de aplicación de carga ha presentado una mejor relación entre los parámetros de tenacidad y energía disipada en el proceso de fractura, lo cual indica una mayor zona de *softening*, o área postpico, respecto al total de energía, lo que permite poder realizar un mejor análisis de la zona post rotura de la mezcla. A su vez, la velocidad elegida corresponde a una velocidad intermedia que permite analizar ligantes de diferente dureza o viscosidad.

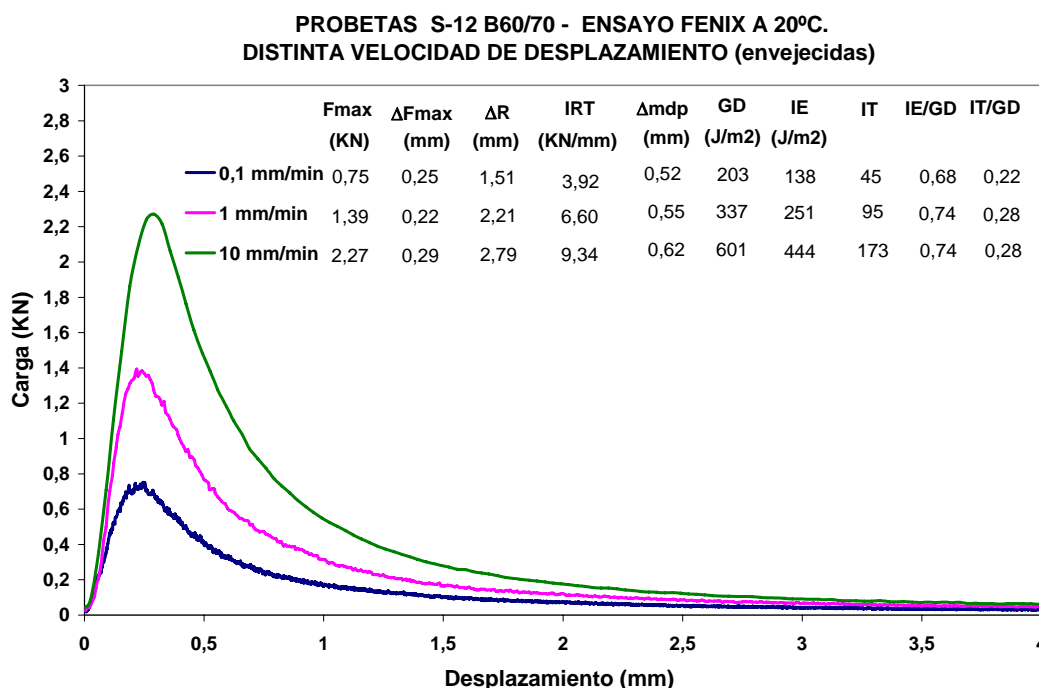


Fig. 4 - 3 Curvas carga – desplazamiento mezcla S-12 (envejecida) a distintas velocidades de aplicación de carga

4.3.3 Influencia del tipo de betún utilizado y temperatura de ensayo

Una vez seleccionada la velocidad de aplicación de la carga en el ensayo Fénix, se analizó la sensibilidad del procedimiento para mostrar la diferencia de comportamiento entre mezclas fabricadas con diferentes tipos de betunes, y como varían estas propiedades al cambiar la temperatura de ensayo: -10, 5 y 20 °C.

Los betunes evaluados fueron tres betunes de penetración y un betún modificado. Dentro de los betunes de penetración, se seleccionaron los dos betunes normalmente usados en la fabricación de mezclas, B60/70 y B40/50, y un betún más duro, B13/22, que se está empezando a utilizar con cierta frecuencia en la fabricación de mezclas de alto módulo. El betún modificado seleccionado fue un BM-3c, cuya penetración y rigidez es similar a un B60/70.

El efecto del tipo de betún utilizado y temperatura de ensayo fue evaluado en una mezcla semidensa tipo S-20. Los resultados medios de los parámetros Fénix se registran en la **Tabla 4 - 1** para cada tipo de betún y temperatura a la cual fueron ensayadas las probetas.

Desde la **Fig. 4 - 4** a la **Fig. 4 - 6**, se presentan las gráficas carga - desplazamiento correspondientes a los resultados obtenidos de la aplicación del ensayo Fénix a la mezcla S-20 con diferentes tipos de betún. En estas gráficas se observa que la mayor parte de las mezclas evaluadas frente

a las variables analizadas presentaron un comportamiento similar. Como se observa en la Fig. 4 - 4, a bajas temperaturas, -10 °C, las mezclas presentaron un comportamiento frágil con altas cargas máximas, F_{max} , y baja capacidad de deformación, Δ_{mdp} .

En la Fig. 4 - 6 se puede observar que a la temperatura de ensayo de 20 °C, las mezclas presentan un comportamiento más dúctil, con altos valores de desplazamiento de rotura, Δ_R , y desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , y además las mezclas evaluadas presentan bajos valores de carga máxima, F_{max} , y rigidez, I_{RT} . Sin embargo, presentan un mayor índice de tenacidad, para valores similares de energía disipada.

A la temperatura media de ensayo de 5 °C, se observó un comportamiento intermedio de los parámetros analizados, Fig. 4 - 5.

Un análisis más detallado para cada parámetro entregado por el ensayo Fénix en este punto, se presenta más adelante en la descripción de las gráficas que van de la Fig. 4 - 7 a la Fig. 4 - 15.

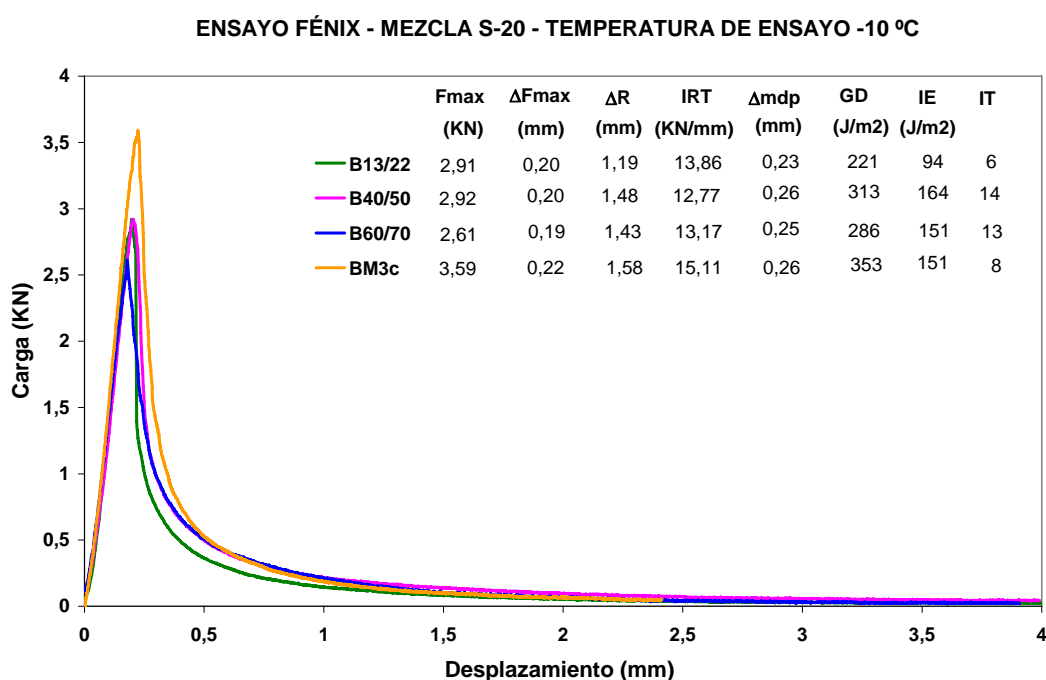


Fig. 4 - 4 Curvas carga – desplazamiento, mezcla S-20, temperatura de ensayo -10 °C



Tabla 4 - 1 Parámetros medios resultantes mezcla S-20 de acuerdo a tipo de betún y temperatura de ensayo

PROBETAS S-20 - 4,3% DE BETÚN											
Tipo de Betún	Temperatura (°C)	Área de fractura Af (mm ²)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resistencia a Tracción RT (Mpa)	Desplazamiento a Fmax ΔFmax (mm)	Desplazamiento de Rotura ΔR (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT (KN/mm)	Desplazamiento 50% Fmax dp Δmdp (mm)	Energía Disipada GD (J/m ²)	Índice de Energía IE (J/m ²)	Índice de Tenacidad IT (J/m ²)·mm
B60/70	-10	2684	2,61	0,99	0,19	1,43	13,17	0,25	286	151	13
	5	2709	1,90	0,71	0,24	3,03	11,37	0,65	603	449	218
	20	2682	0,54	0,21	0,25	2,43	6,00	1,07	248	201	191
B40/50	-10	2680	2,92	1,11	0,20	1,48	12,77	0,26	313	164	14
	5	2691	2,40	0,91	0,22	2,07	12,75	0,38	437	279	54
	20	2656	0,93	0,36	0,25	2,27	7,00	0,81	334	257	167
B13/22	-10	2985	2,91	1,00	0,20	1,19	13,86	0,23	221	94	6
	5	2727	3,34	1,25	0,23	1,92	15,12	0,26	401	190	7
	20	2739	1,45	0,54	0,25	2,69	8,64	0,68	464	357	179
BM3c	-10	2752	3,59	1,33	0,22	1,58	15,11	0,26	353	151	8
	5	2722	1,76	0,66	0,26	3,59	9,97	0,76	673	540	303
	20	2727	0,71	0,27	0,38	4,00	3,90	1,57	494	398	525



ENSAYO FÉNIX - MEZCLA S-20 - TEMPERATURA DE ENSAYO 5 °C

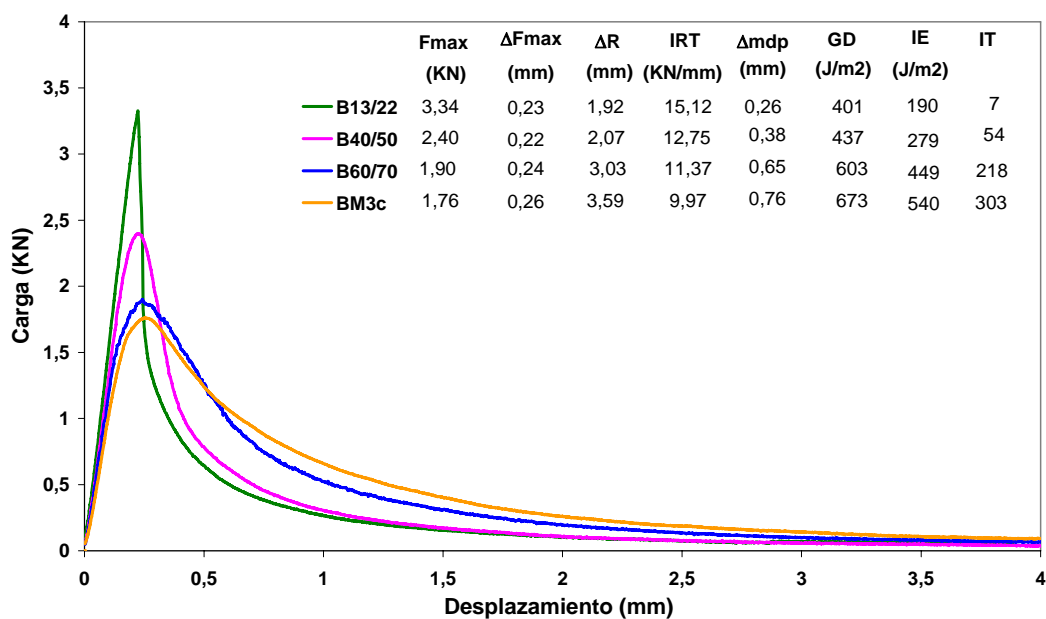


Fig. 4 - 5 Curvas carga – desplazamiento, mezcla S-20, temperatura de ensayo 5 °C

ENSAYO FÉNIX - MEZCLA S-20 - TEMPERATURA DE ENSAYO 20 °C

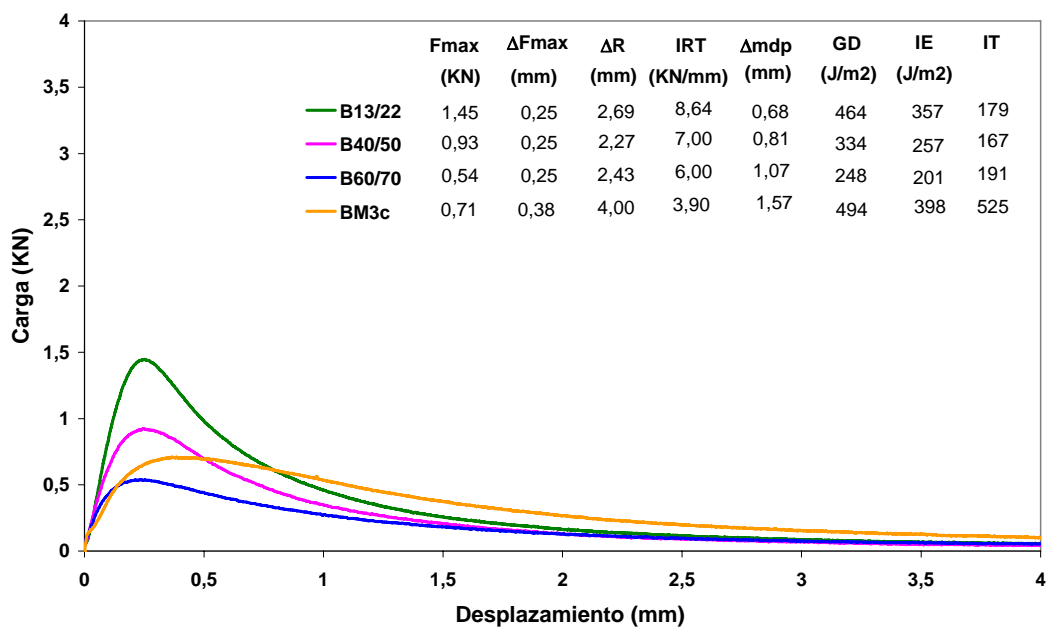


Fig. 4 - 6 Curvas carga – desplazamiento, mezcla S-20, temperatura de ensayo 20 °C

A continuación se presenta un análisis para cada uno de los parámetros entregados por el ensayo Fénix, evaluados en la mezcla S-20, en función de los distintos tipos de betunes utilizados y temperaturas de ensayo.

En la Fig. 4 - 7 se representa la variación de la carga máxima a tracción, F_{max} , versus la temperatura de ensayo, T^0 , en la cual se observa que a temperaturas bajas, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, la máxima carga registrada corresponde a la mezcla que emplea el betún BM3c. Sin embargo, a medida que se incrementa la temperatura de ensayo, se observa que la mezcla que utiliza el betún más duro, el B13/22, soporta una mayor carga máxima que el resto de los betunes analizados. Este mismo comportamiento es el que puede observarse en la Fig. 4 - 8 que representa la resistencia a tracción de la mezcla en función de la temperatura de ensayo.

Otro aspecto que se observa en ambas figuras señaladas, Fig. 4 - 7 y Fig. 4 - 8, es que las mezclas fabricadas con los ligantes más blandos se van haciendo más resistentes al bajar la temperatura, puesto que el betún se hace más viscoso. Por otra parte, la mezcla fabricada con el betún más duro, B13/22, también presenta inicialmente este comportamiento, aunque a la temperatura más baja, la resistencia y cohesión del betún, ya no aumenta, sino que puede llegar a ser más frágil y menos resistente.

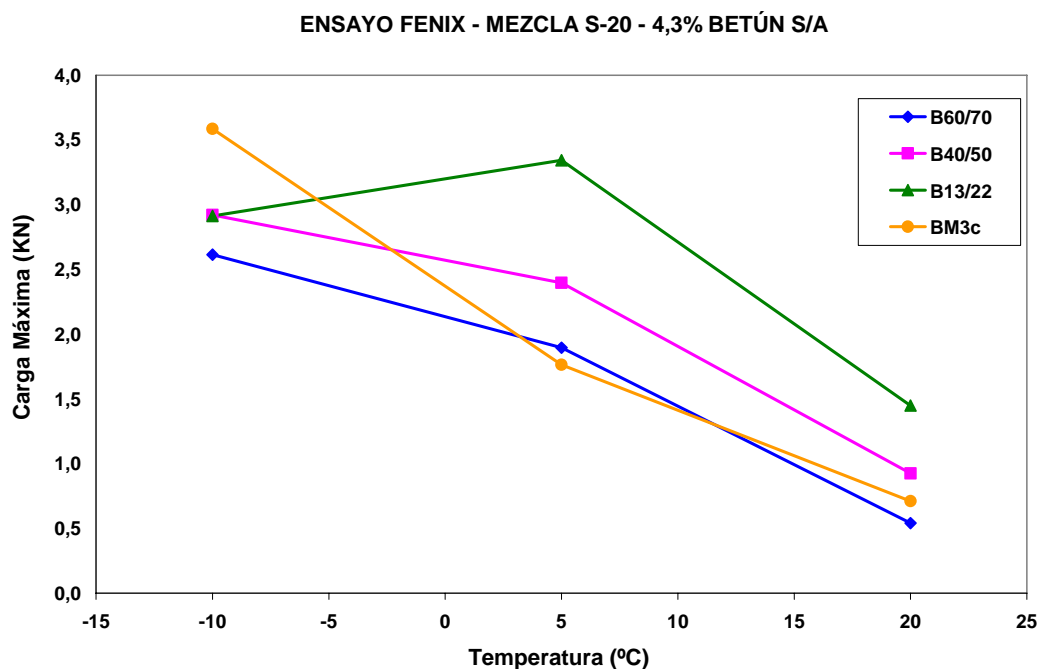


Fig. 4 - 7 Curvas carga máxima a tracción – temperatura de ensayo, mezcla S-20

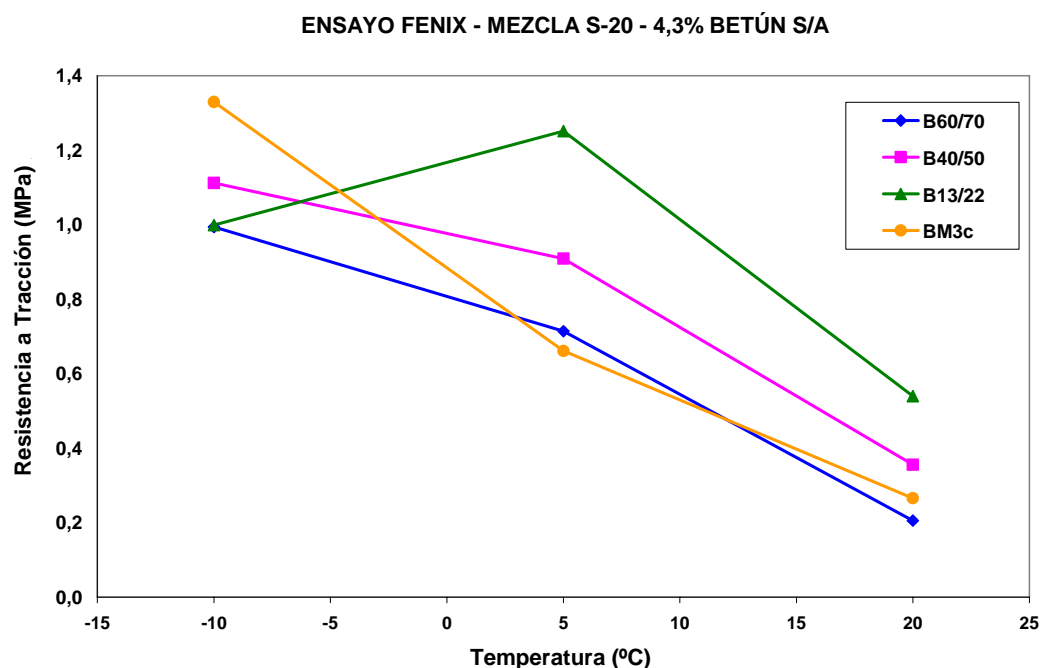


Fig. 4 - 8 Curvas resistencia a tracción – temperatura de ensayo, mezcla S-20

La Fig. 4 - 9 presenta la variación del desplazamiento a carga máxima, ΔF_{\max} , versus la temperatura de ensayo, T^0 . En esta figura se observa que la mezcla que utiliza el betún BM3c es la que registra un mayor desplazamiento a carga máxima a todas las temperaturas ensayadas. En los demás betunes evaluados se registran similares desplazamientos a carga máxima, a excepción de la mezcla que utiliza el betún B60/70, la cual, a la temperatura de ensayo de 5 °C, muestra un mayor desplazamiento que los betunes B13/22 y B40/50.

El desplazamiento de rotura, Δ_R , versus la temperatura de ensayo, T^0 , se ha representado en la Fig. 4 - 10. En esta figura se observa que la mezcla que utiliza el betún BM3c es la que registra, en todas las temperaturas ensayadas, el mayor desplazamiento de rotura. Para el resto de las mezclas evaluadas, se observa que la mezcla con betún B60/70, es la que registra mayor desplazamiento de rotura a la temperatura de ensayo de 5 °C. Este gráfico muestra claramente la mayor tenacidad de las mezclas fabricadas con betunes modificados.

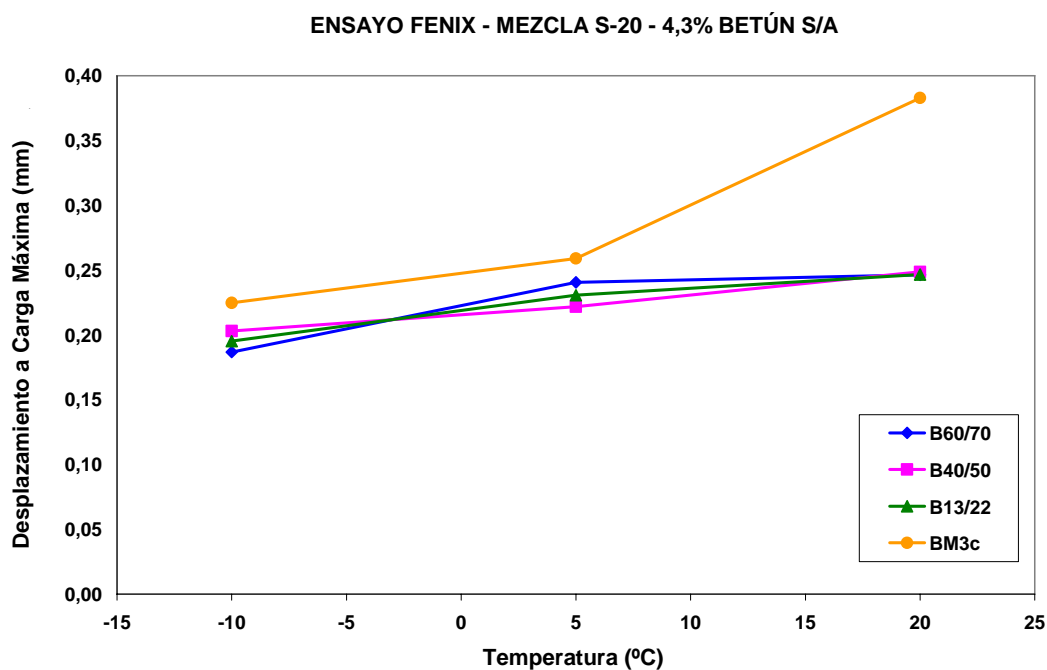


Fig. 4 - 9 Curvas desplazamiento a carga máxima – temperatura de ensayo, mezcla S-20

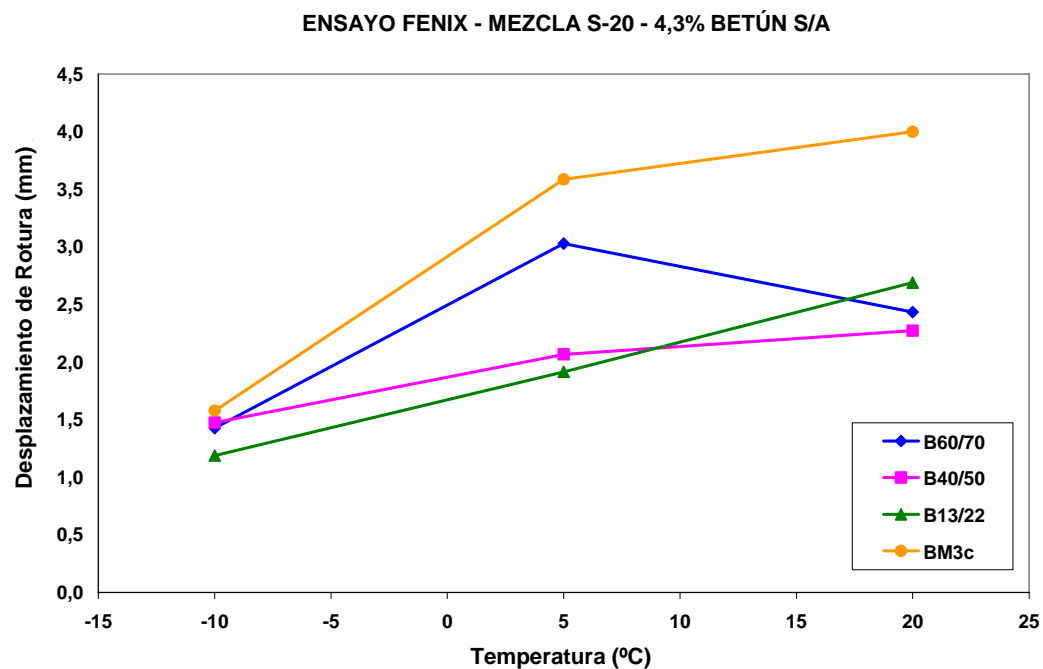


Fig. 4 - 10 Curvas desplazamiento de rotura – temperatura de ensayo, mezcla S-20



En la Fig. 4 - 11 se representa el índice de rigidez a tracción, I_{RT} , versus la temperatura de ensayo, T° . En esta gráfica se observa una mayor rigidez de la mezcla con betún BM3c a bajas temperaturas, -10°C . Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura de ensayo se aprecia que la mayor rigidez la registra la mezcla con el betún B13/22, producto de la mayor dureza y viscosidad del betún. Al igual como ocurre con la resistencia a tracción, la mezcla fabricada con el betún más duro, B13/22, presenta su máximo valor de rigidez a los 5°C .

La Fig. 4 - 12 muestra el desplazamiento registrado una vez que la carga ha caído al 50% de su valor máximo. Se observa que a bajas temperaturas, -10°C , las mezclas no presentan diferencias en los desplazamientos producto de la alta rigidez que poseen. Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura se observa que la mezcla fabricada con el betún modificado BM3c es la que registra mayores valores de desplazamiento cuando la carga ha caído al 50%, seguida por las mezclas fabricadas con ligantes de mayor a menor penetración. Se observa claramente que este parámetro es un indicador que interpreta la capacidad de admitir deformación por parte de la mezcla.

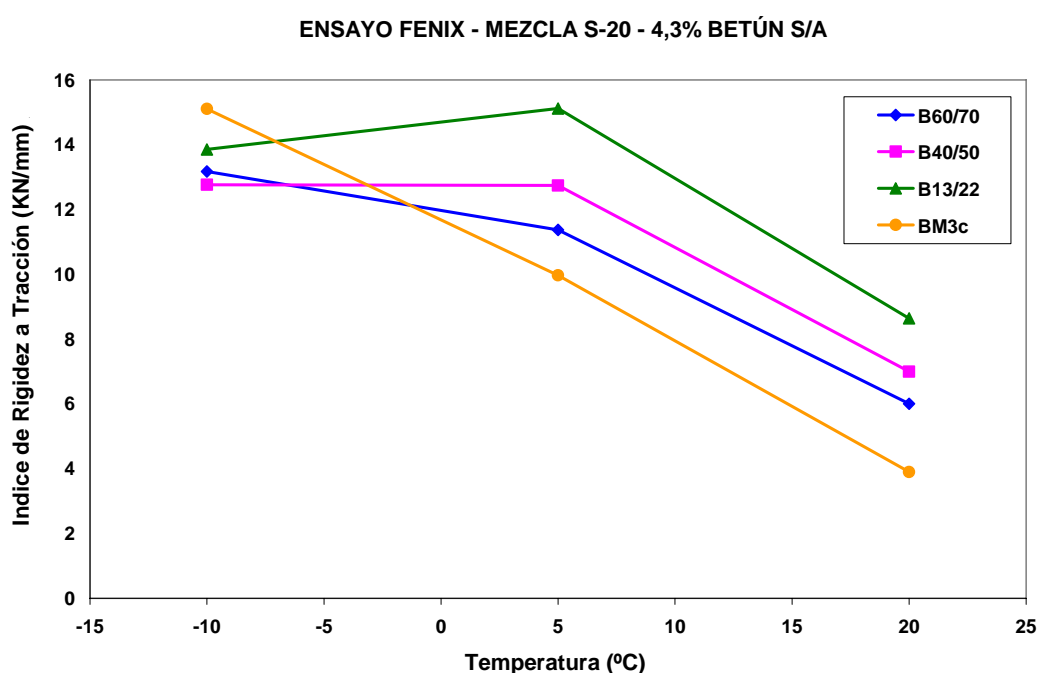


Fig. 4 - 11 Curvas índice de rigidez a tracción – temperatura de ensayo, mezcla S-20

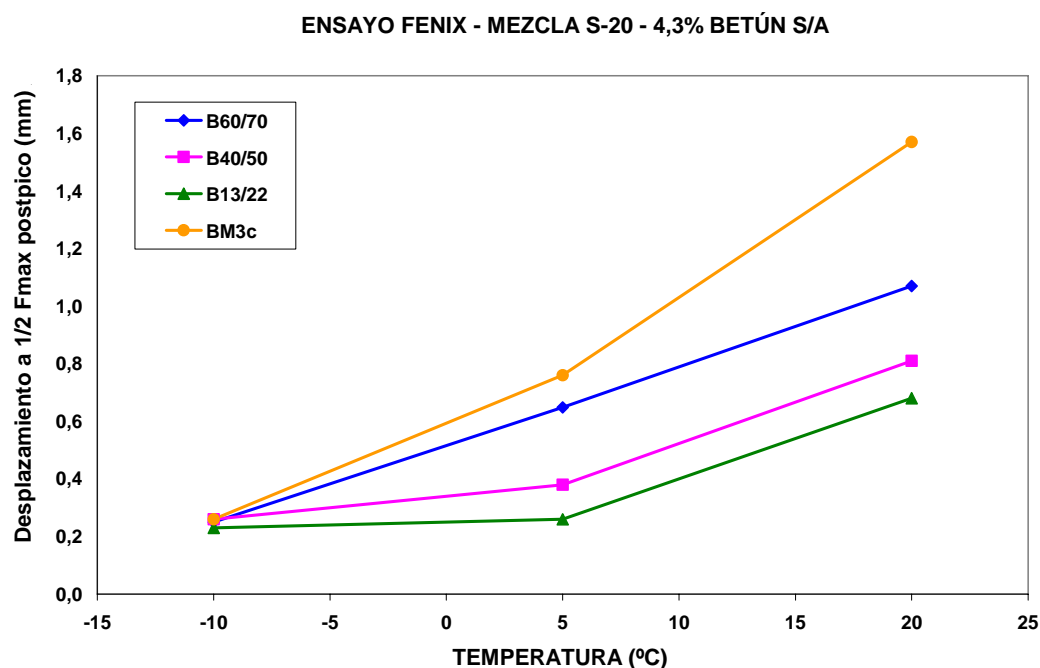


Fig. 4 - 12 Curvas desplazamiento al 50% F_{max} postpico – temperatura de ensayo, mezcla S-20

En la Fig. 4 - 13 se representa la energía disipada en el proceso de fisuración, G_D , versus la temperatura de ensayo, T^0 . En esta gráfica se muestra que la energía disipada varía con la temperatura de ensayo. La mezcla con betón modificado BM3c, presenta la mayor energía disipada en todas las temperaturas evaluadas. A la temperatura de 5 °C, la mayoría de las mezclas evaluadas obtienen su mayor energía disipada, a excepción de la mezcla con betón B13/22, que registra mayor energía disipada a la temperatura de ensayo de 20 °C, debido a la alta viscosidad del betón empleado y que el betón señalado exhibe un mejor desempeño a temperaturas altas. También se observa que la mayor caída de la energía disipada la presenta el betón más blando, al pasar de 5 a 20 °C.

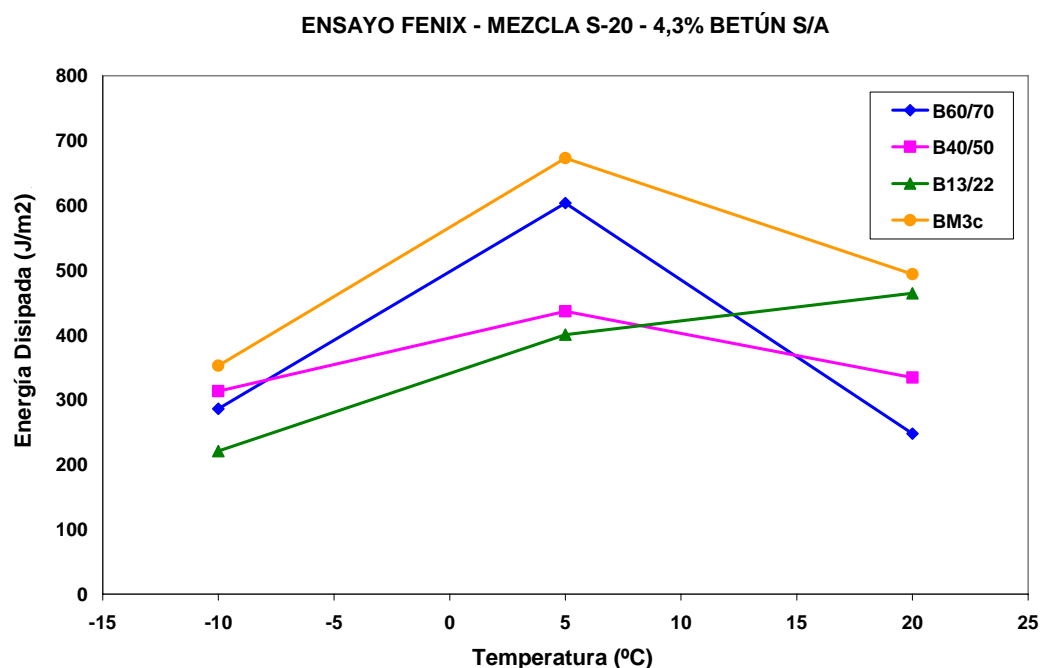


Fig. 4 - 13 Curvas energía disipada – temperatura de ensayo, mezcla S-20

La variación del índice de energía, I_E , respecto a la temperatura de ensayo se representa en la Fig. 4 - 14. En ella se observa como a bajas temperaturas, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, la mezcla fabricada con el ligante más viscoso, B13/22, presenta una alta fragilidad con un bajo índice de energía, mientras que las mezclas fabricadas con los ligantes de una penetración mayor, junto con la fabricada con el betún modificado, presentan un índice de energía similar. A la temperatura de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, las mezclas fabricadas con los ligantes de mayor penetración, B60/70 y B40/50, junto con la mezcla fabricada con el ligante modificado BM3c, obtienen su índice de energía más alto, mostrando a su vez, una mayor diferencia entre las mezclas más frágiles, respecto de las más dúctiles, en relación al parámetro de energía disipada, ilustrado en la Fig. 4 - 13. A la temperatura de ensayo de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, la mezcla fabricada con el ligante B13/22, mejora su comportamiento exhibiendo un mayor índice de energía respecto a las otras mezclas fabricadas con los ligantes de mayor penetración. Este índice ha sido propuesto para diferenciar el comportamiento de las mezclas en la zona de softening, o postpico, de manera que se quede reflejado el comportamiento de una mezcla más dúctil respecto a otra. Sin embargo, los resultados obtenidos son similares a los entregados por la energía disipada, G_D , no aportando mayor información del comportamiento de la mezcla.

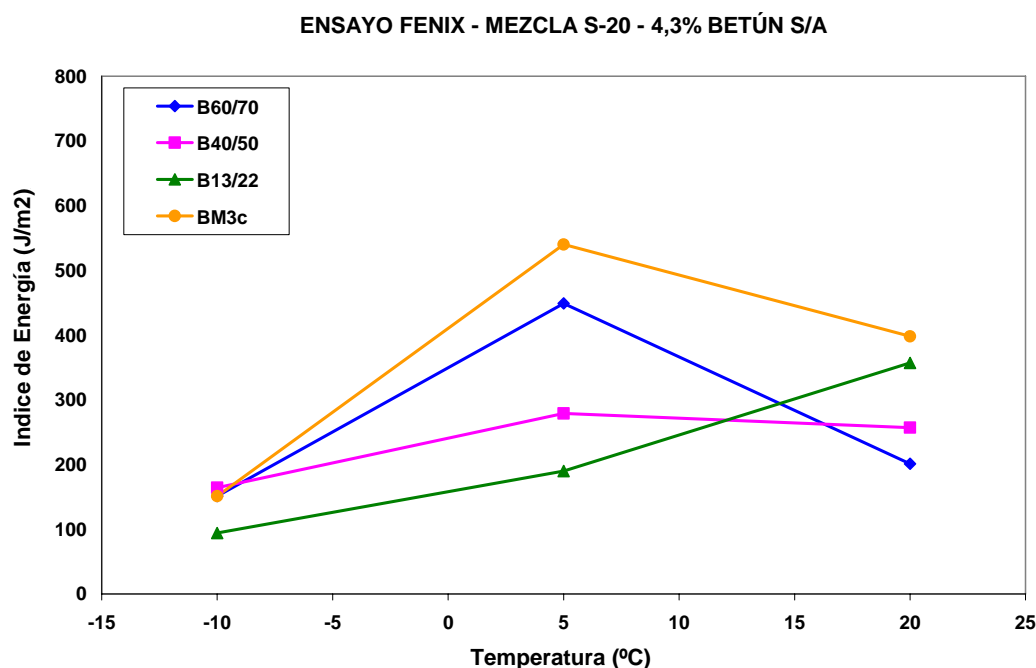


Fig. 4 - 14 Curvas índice de energía – temperatura de ensayo, mezcla S-20

En la Fig. 4 - 15 se representa el índice de tenacidad, I_T , versus la temperatura de ensayo, T^0 . En esta gráfica se puede observar como varía la tenacidad de las mezclas que utilizaron diferentes betunes con la variación de la temperatura. A bajas temperaturas, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, las mezclas evaluadas se comportaron de forma similar, con un comportamiento frágil y un valor de tenacidad muy bajo. A medida que se incrementa la temperatura, se observa que la mezcla con el betún modificado BM3c aumenta su tenacidad, por encima de las otras mezclas evaluadas. La mezcla con el betún de menor penetración, el B13/22, empieza a mostrar una mayor tenacidad a temperaturas más altas, 20°C . Por otra parte, la mezcla con el betún menos viscoso, el B60/70, muestra su mayor tenacidad a la temperatura de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, puesto que a temperaturas superiores, la mezcla comienza a presentar un comportamiento menos resistente, disminuyendo su energía y tenacidad. Este índice muestra claramente el comportamiento más frágil de las mezclas que utilizaron los ligantes más viscosos, B40/50 y B13/22, a la temperatura de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

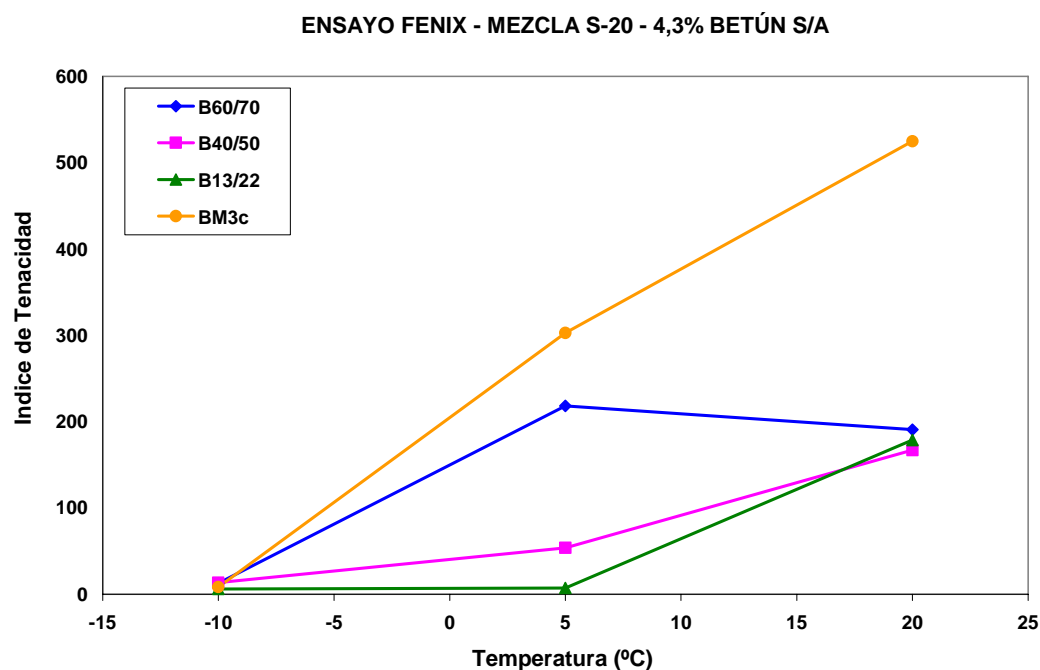


Fig. 4 - 15 Curvas índice de tenacidad – temperatura de ensayo, mezcla S-20

4.3.4 Influencia del porcentaje de betún utilizado y temperatura de ensayo

El efecto del contenido de betún en la mezcla y de la temperatura de ensayo fueron evaluadas en una mezcla gruesa tipo G-20. En este análisis se utilizaron los betunes de distinta penetración B60/70, B40/50 y B13/22. Los porcentajes estudiados fueron 3,5, 4,5 y 5,5% s/a. Para cada tipo de mezcla las temperaturas de ensayo fueron -10, 5 y 20 °C.

Los resultados medios de los parámetros obtenidos de los ensayos Fénix realizados sobre estas mezclas se presentan en la **Tabla 4 - 2**.

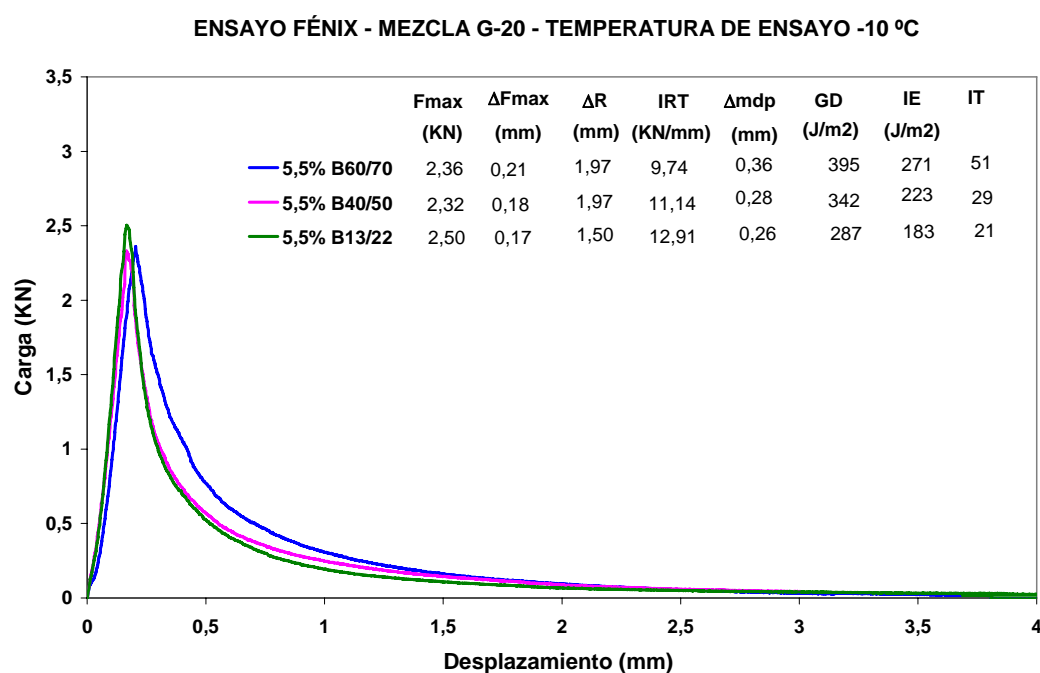
Desde la **Fig. 4 - 16** a la **Fig. 4 - 18** se han representado las curvas carga - desplazamiento en función de la temperatura de ensayo para las mezclas G-20 con un contenido de betún del 5.5%, con los tres tipos de betún utilizados, B60/70, B40/50 y B13/22.



Tabla 4 - 2 Parámetros medios resultantes del ensayo Fénix, mezcla G-20 de acuerdo al tipo y contenido de betún, y temperatura de ensayo.

PARÁMETROS PROBETAS MEZCLA G-20												
Tipo de Betún	Temperatura (°C)	Contenido de Betún (%)	Área de fractura Af (mm ²)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resistencia a Tracción RT (MPa)	Desplazamiento a Fmax ΔFmax (mm)	Desplazamiento de Rotura ΔR (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT (KN/mm)	Desplazamiento 50% Fmax dp Δmdp (mm)	Energía Disipada GD (J/m ²)	Índice de Energía IE (J/m ²)	Índice de Tenacidad IT (J/m ²)-mm
B60/70	-10	3,5	2848	2,42	0,87	0,15	1,70	13,76	0,24	305	197	23
	5		2836	1,90	0,68	0,23	3,20	9,90	0,64	571	443	205
	20		2821	0,47	0,17	0,32	2,51	3,08	1,12	217	171	151
B60/70	-10	4,5	2799	2,45	0,89	0,19	1,89	11,82	0,32	372	238	38
	5		2799	2,08	0,76	0,29	4,37	9,20	0,71	823	642	318
	20		2786	0,39	0,14	0,32	2,93	2,94	1,50	240	193	263
B60/70	-10	5,5	2765	2,36	0,87	0,21	1,97	9,74	0,36	395	271	51
	5		2760	1,74	0,64	0,33	5,51	6,87	0,95	928	763	526
	20		2790	0,35	0,13	0,43	2,96	2,42	1,81	225	159	262
B40/50	-10	3,5	2753	2,34	0,87	0,18	1,51	11,90	0,22	235	120	8
	5		2753	2,10	0,78	0,25	2,89	10,03	0,44	465	318	77
	20		2732	0,86	0,32	0,28	2,69	5,37	0,83	342	256	162
B40/50	-10	4,5	2755	2,43	0,90	0,19	2,10	11,73	0,26	412	281	30
	5		2785	1,71	0,63	0,30	3,18	9,12	0,78	617	465	261
	20		2746	0,75	0,28	0,32	2,72	5,04	1,04	345	257	215
B40/50	-10	5,5	2733	2,32	0,87	0,18	1,97	11,14	0,28	342	223	29
	5		2774	1,93	0,71	0,30	5,03	8,56	0,75	890	721	363
	20		2795	0,65	0,24	0,38	3,60	4,39	1,48	411	316	396
B13/22	-10	3,5	2803	2,30	0,84	0,15	1,05	14,04	0,20	192	94	7
	5		2804	2,33	0,85	0,18	2,14	15,52	0,26	355	227	24
	20		2798	1,16	0,42	0,23	3,71	8,65	0,81	474	395	253
B13/22	-10	4,5	2775	2,42	0,89	0,16	1,23	13,16	0,21	208	102	8
	5		2789	2,61	0,96	0,18	2,55	12,62	0,26	411	281	26
	20		2804	1,22	0,44	0,32	4,31	7,32	1,20	670	544	555
B13/22	-10	5,5	2823	2,50	0,90	0,17	1,50	12,91	0,26	287	183	21
	5		2820	2,44	0,88	0,26	4,43	10,75	0,57	752	571	201
	20		2776	1,22	0,45	0,35	6,45	6,97	1,37	1026	891	976

Como se observa en la Fig. 4 - 16 todas las mezclas evaluadas presentan una alta rigidez, I_{RT} , obteniendo el mayor valor la mezcla que utilizó el betún de menor penetración. El parámetro de desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , nos indica que la mezcla con el betún de mayor penetración, es la que es capaz de admitir mayor deformación. La energía disipada en el proceso de fisuración, G_D , el índice de energía, I_E , y el índice de tenacidad, I_T , de las mezclas evaluadas a bajas temperaturas, indican que a medida que se utiliza un betún menos viscoso, se obtiene un mejor comportamiento.



**Fig. 4 - 16 Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo -10 °C
Betunes B13/22, B40/70 y B60/70 - 5,5% de betún**

A la temperatura de 5 °C, Fig. 4 - 17, se observa que las mezclas evaluadas disminuyen su rigidez, pero aumentan de forma considerable su energía disipada y tenacidad, respecto al comportamiento presentado a -10 °C. A la temperatura de 5 °C la mezcla con el betún de mayor penetración es la que presenta una mayor capacidad de admitir deformación y de disipar energía en todo el proceso de fisuración, así como en la zona de *softening*. A su vez, la mezcla que utiliza el betún más viscoso es la que presenta una mayor rigidez, pero menores valores de tenacidad.

Como se observa en la Fig. 4 - 18, a una temperatura de ensayo de 20 °C, la mezcla que presenta un mejor comportamiento es la fabricada con el betún de menor penetración, B13/22, presentando los mayores valores de los parámetros de energía disipada, G_D , índice de energía, I_E , y tenacidad, I_T , junto con una mayor rigidez, I_{RT} .



ENSAYO FÉNIX - MEZCLA G-20 - TEMPERATURA DE ENSAYO 5 °C

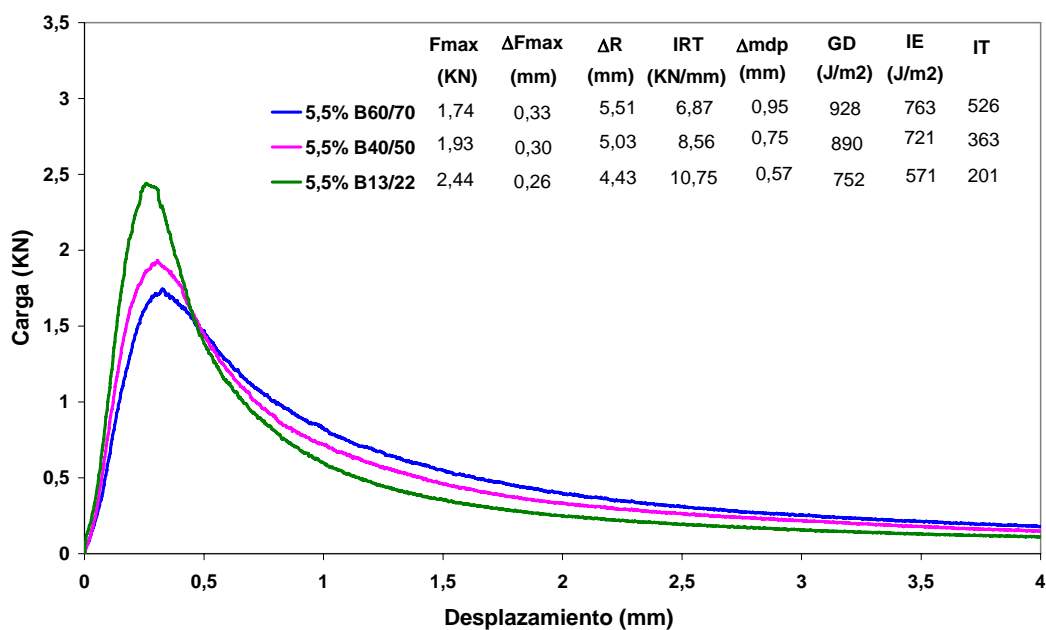


Fig. 4 - 17 Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo 5 °C
Betunes B13/22, B40/70 y B60/70 - 5,5% de betún

ENSAYO FÉNIX - MEZCLA G-20 - TEMPERATURA DE ENSAYO 20 °C

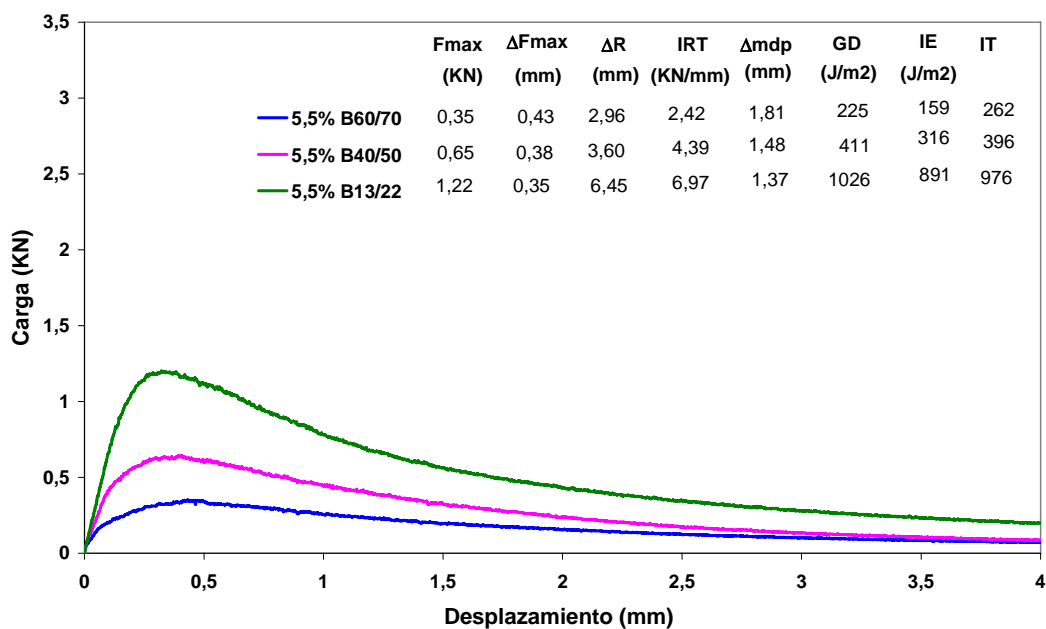


Fig. 4 - 18 Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo 20 °C
Betunes B13/22, B40/70 y B60/70 - 5,5% de betún

De la Fig. 4 - 19 a la Fig. 4 - 21 se han graficado las curvas de carga – desplazamiento en función del porcentaje de betún empleado en la mezcla, para todos los betunes evaluados, a las distintas temperaturas de ensayo.

En la Fig. 4 - 19 se observa que, a la temperatura de ensayo de -10°C , todas las mezclas evaluadas tuvieron un comportamiento rígido y frágil. Sin embargo, al analizar el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , se observa que a mayor contenido de betún en la mezcla se incrementa la capacidad de admitir deformación por parte de la mezcla. A su vez, se aprecia una tendencia a aumentar la tenacidad y la capacidad de disipar energía durante el proceso de fisuración a medida que aumenta el contenido de ligante.

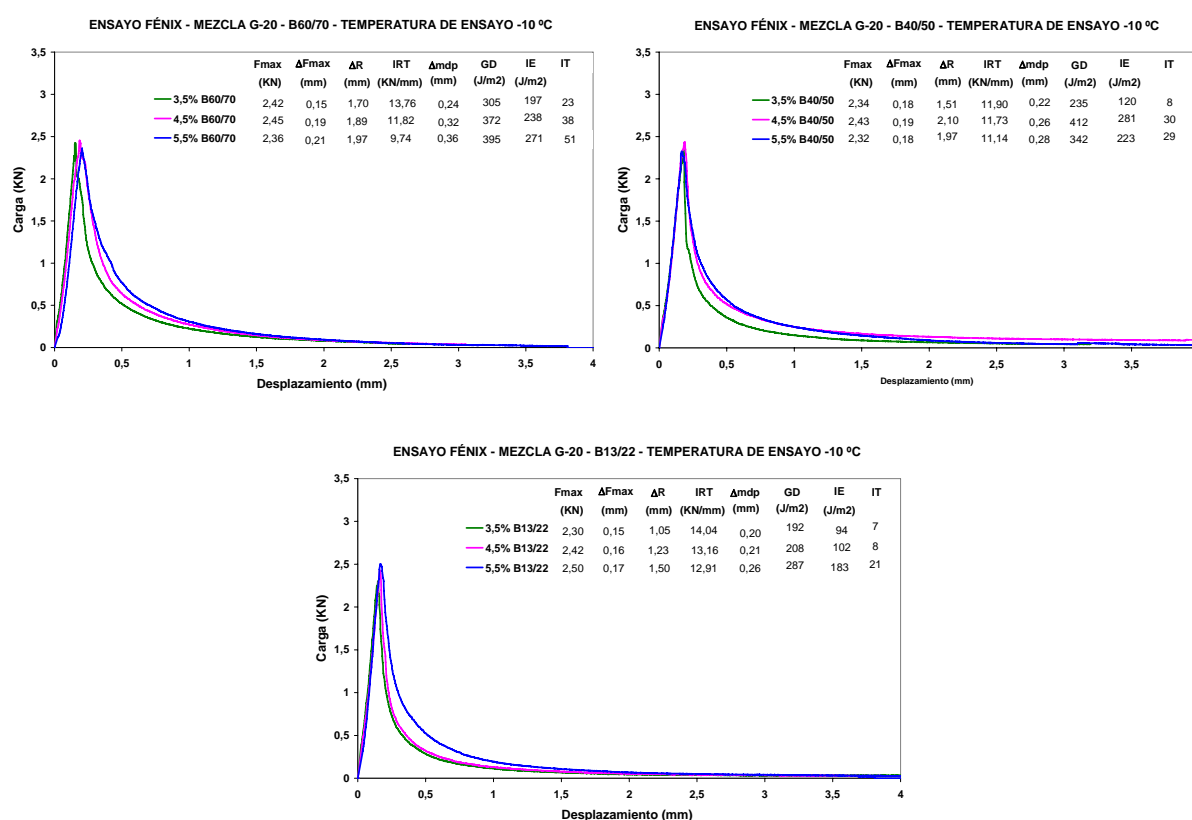


Fig. 4 - 19 Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo -10°C
Betunes B60/70, B40/70 y B13/22 – distintos contenidos de betún

Los resultados obtenidos en los ensayos efectuados a 5°C , que se presentan en la Fig. 4 - 20, muestran una mayor influencia del contenido de ligante en la rigidez de las mezclas, a diferencia de lo observado a la temperatura de ensayo de -10°C . En relación a la tenacidad y la energía disipada se observa claramente un aumento de sus valores conforme aumenta el contenido de betún, al igual que la capacidad de admitir deformación de la mezcla. Respecto a la carga máxima, F_{max} , tiende a disminuir conforme aumenta el contenido de ligante.

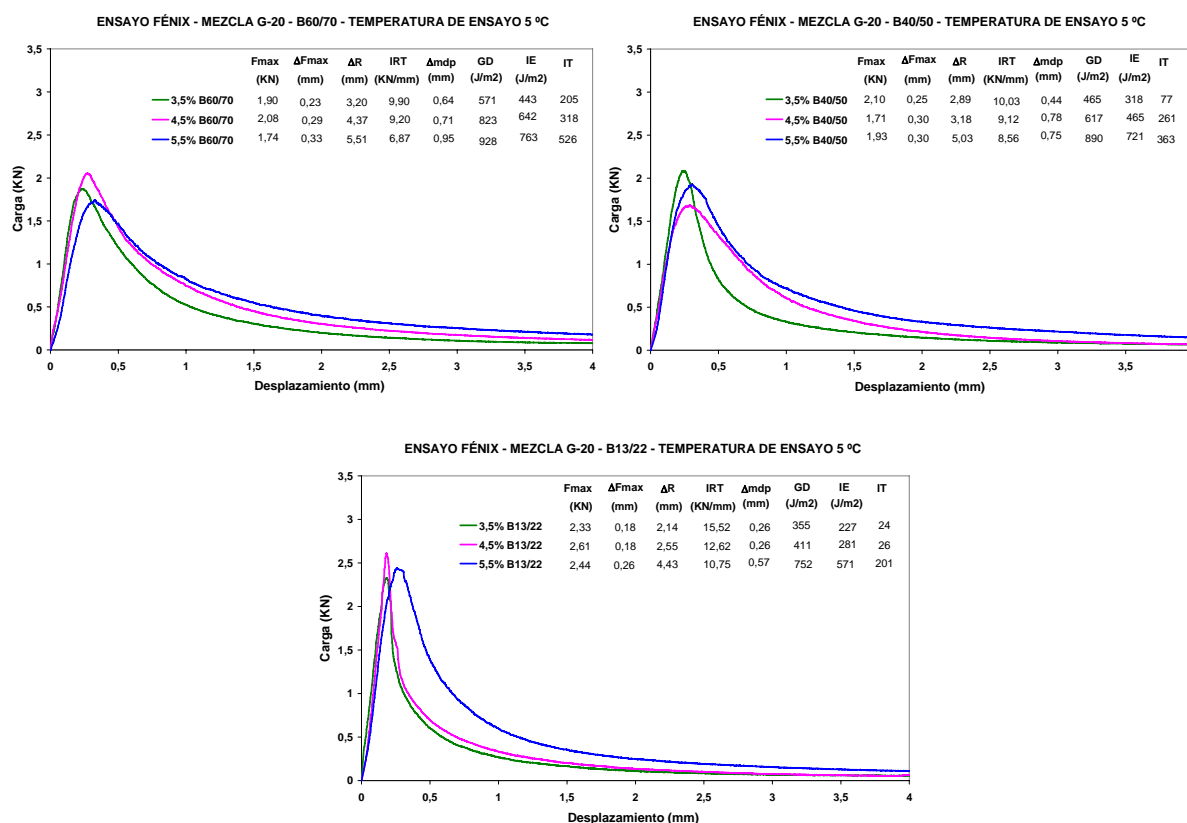


Fig. 4 - 20 Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo 5°C
Betunes B60/70, B40/70 y B13/22 – distintos contenidos de betún

Los resultados obtenidos para la temperatura de ensayo de 20 °C, presentados en la Fig. 4 - 21, muestran una mayor diferencia entre los parámetros calculados en las mezclas fabricadas con los distintos tipos de betún. Los valores obtenidos para la rigidez de la mezcla, I_{RT} , son bastante mayores en las mezclas con el betún de menor penetración, B13/22, para los tres contenidos evaluados. En las mezclas con el betún de mayor penetración, B60/70, se observa un comportamiento bastante dúctil, registrándose mínimas diferencias entre los parámetros evaluados para los tres contenidos de betún utilizados. Sin embargo, en las mezclas con el betún B13/22 se observa una mayor influencia del contenido de betún utilizado, obteniéndose mayores valores de energía disipada, G_D , índice de energía, I_E , tenacidad, I_T , y desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , en la mezcla con el mayor porcentaje de betún.

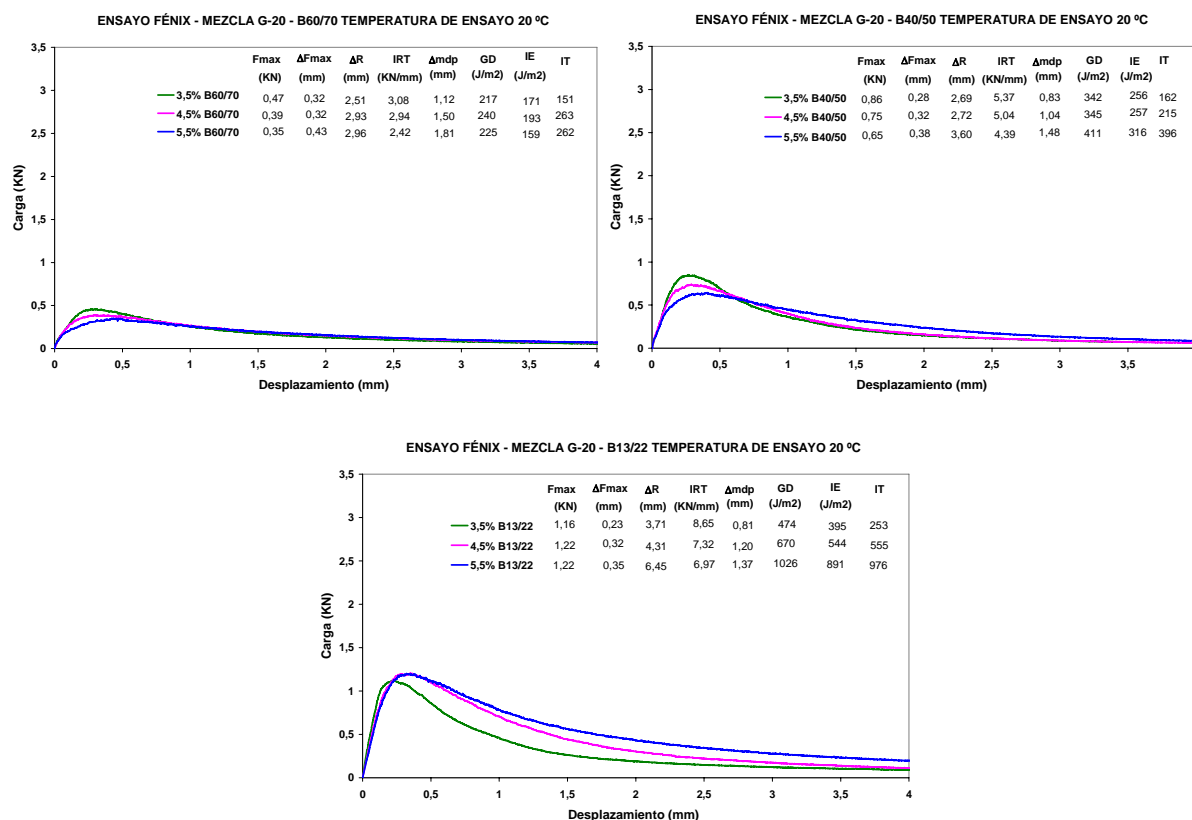


Fig. 4 - 21 Curvas carga – desplazamiento, mezcla G-20, temperatura de ensayo 20°C
Betunes B60/70, B40/70 y B13/22 – distintos contenidos de betún

A continuación se presenta un análisis para cada uno de los parámetros entregados por el ensayo Fénix, evaluados en la mezcla G-20, en función de los distintos tipos y contenidos de betún utilizados, a las distintas temperaturas de ensayo.

En la Fig. 4 - 22 se presenta la variación de la carga máxima a tracción, F_{max} , versus la temperatura de ensayo, T^0 , para las mezclas evaluadas en función de su tipo y contenido de betún. En esta figura se observa que la mezcla confeccionada con el betún B13/22 es la que registra a mayores temperaturas de ensayo, 5 y 20 °C, una mayor carga máxima a tracción. A temperaturas bajas, - 10 °C, se observa que para los distintos contenidos de betún evaluados, se registraron cargas máximas similares, con un comportamiento muy rígido, cuyos valores fluctuaron entre 2,3 y 2,5 KN.

Entre las mezclas fabricadas con los ligantes B60/70 y B40/50, a 5 °C se observan pocas diferencias entre ellas. A la temperatura de ensayo de 20 °C, es la mezcla con el betún B40/50, para cualquier contenido, la que obtiene mejores resistencias, duplicando la carga máxima resistida para cada contenido de betún utilizado respecto a la mezcla que utiliza el betún B60/70. Este mismo comportamiento es el que puede observarse en la Fig. 4 - 23, en la que se representa la resistencia a tracción de la mezcla en función de la temperatura de ensayo.

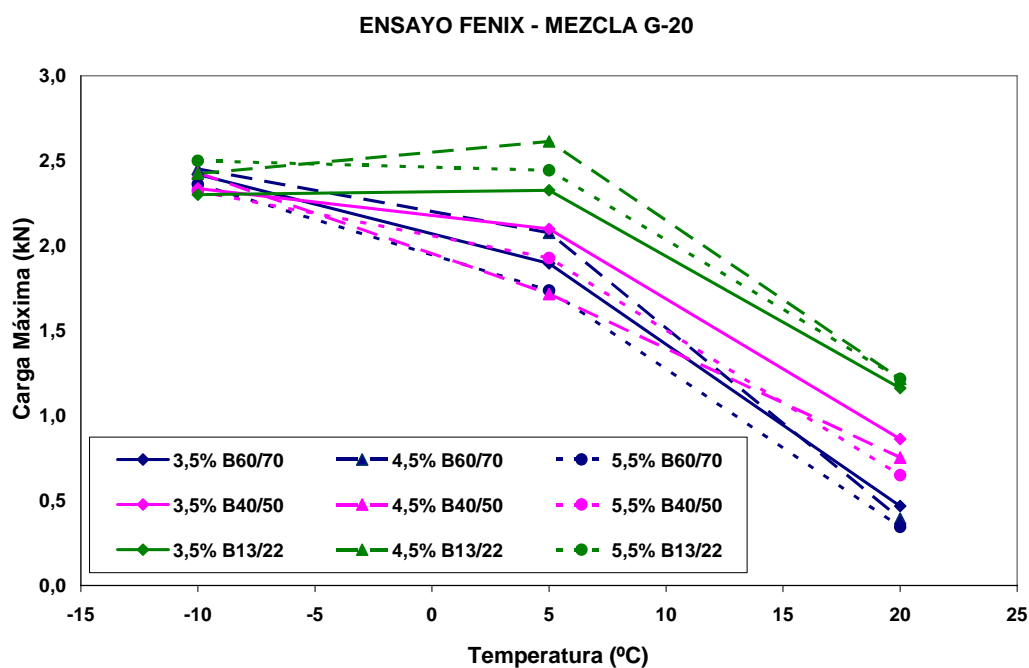


Fig. 4 - 22 Curvas carga máxima a tracción – temperatura de ensayo, mezcla G-20

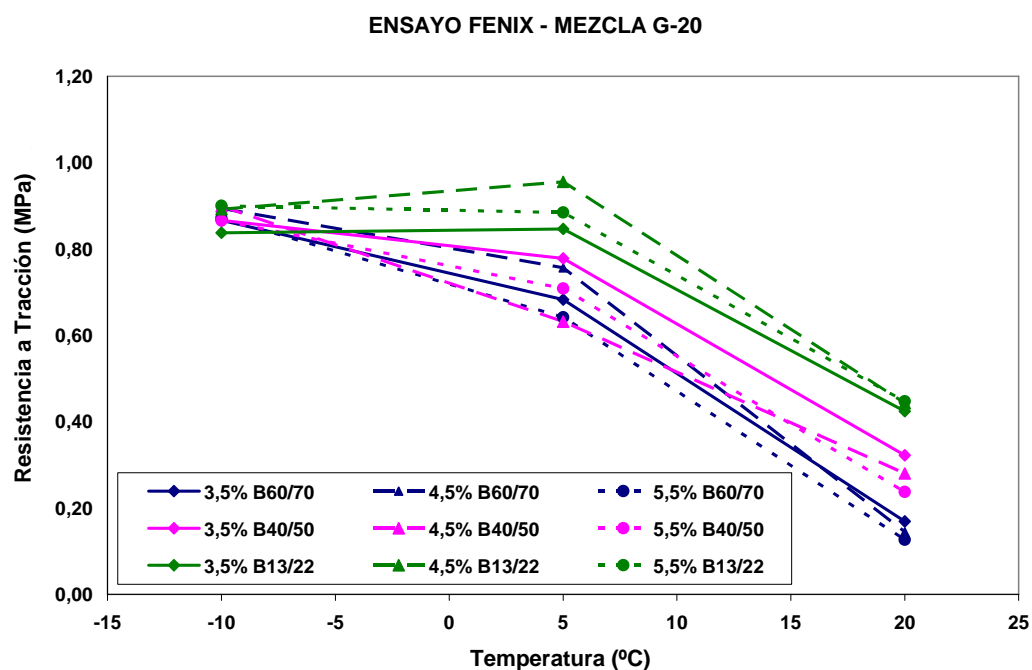


Fig. 4 - 23 Curvas resistencia a tracción – temperatura de ensayo, mezcla G-20

En la Fig. 4 - 24, se registra el desplazamiento a carga máxima, ΔF_{\max} , en función de la temperatura de ensayo, T° . En esta figura se puede observar, que para todas las temperaturas de ensayo evaluadas, la mezcla que se fabricó con un 5,5% de betún B60/70 es la que presenta el mayor desplazamiento a carga máxima. A su vez, se muestra que existe una tendencia a aumentar los desplazamientos a carga máxima a medida que aumenta el contenido de ligante y la temperatura de ensayo.

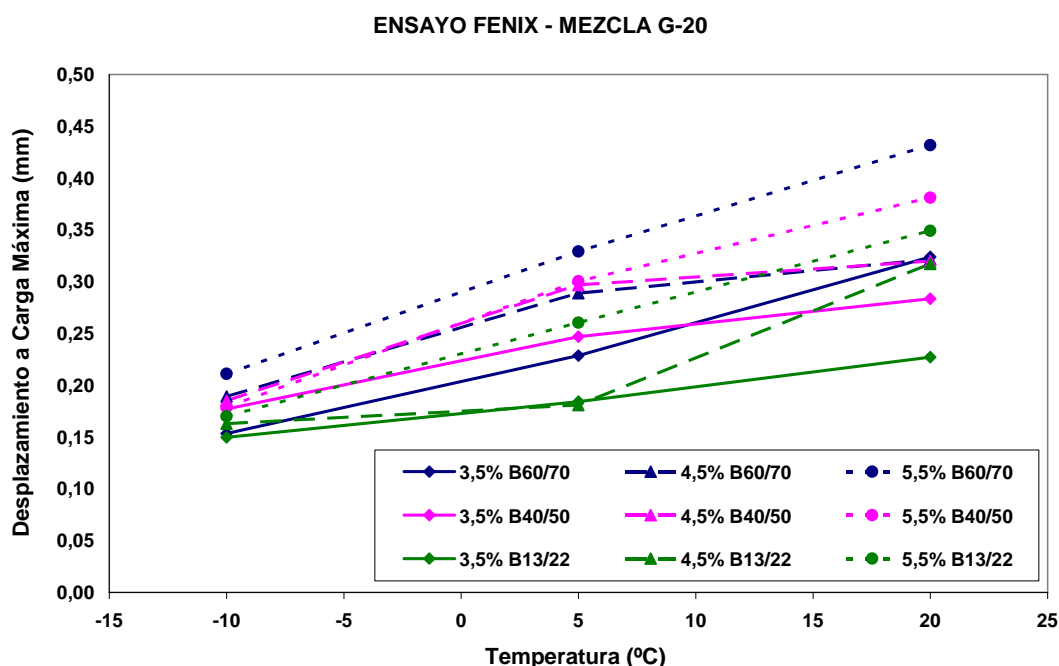


Fig. 4 - 24 Curvas desplazamiento a carga máxima – temperatura de ensayo, mezcla G-20

El desplazamiento a rotura, Δ_R , en función de la temperatura de ensayo, T° , se ha representado en la Fig. 4 - 25. En ésta se observa que en los ensayos realizados a bajas temperaturas, -10°C , la mayoría de las mezclas evaluadas presentan su desplazamiento de rotura entre 1 y 2 mm, mostrando una alta fragilidad. Para la temperatura media de ensayo de 5°C , se observa un incremento en los desplazamientos de rotura a medida que aumenta el contenido de betún en la mezcla para todos los betunes analizados, observándose el mayor incremento en la mezcla con el betún B60/70. Para la temperatura de ensayo de 20°C , la mezcla fabricada con el betún B13/22 presenta el mayor desplazamiento de rotura para todos los contenidos y tipo de betún evaluados, debido a la mayor dureza y viscosidad del betún B13/22. Como tendencia general se observa que, a medida que aumenta el contenido de ligante, aumenta el desplazamiento de rotura, para las distintas temperaturas de ensayo. También se observa que, para la temperatura de ensayo de 20°C , con los betunes blandos y alto contenido de betún, la resistencia a la rotura es muy baja, por lo que se llega a la carga establecida como de rotura (0,1KN) con menores valores de deformación de rotura.

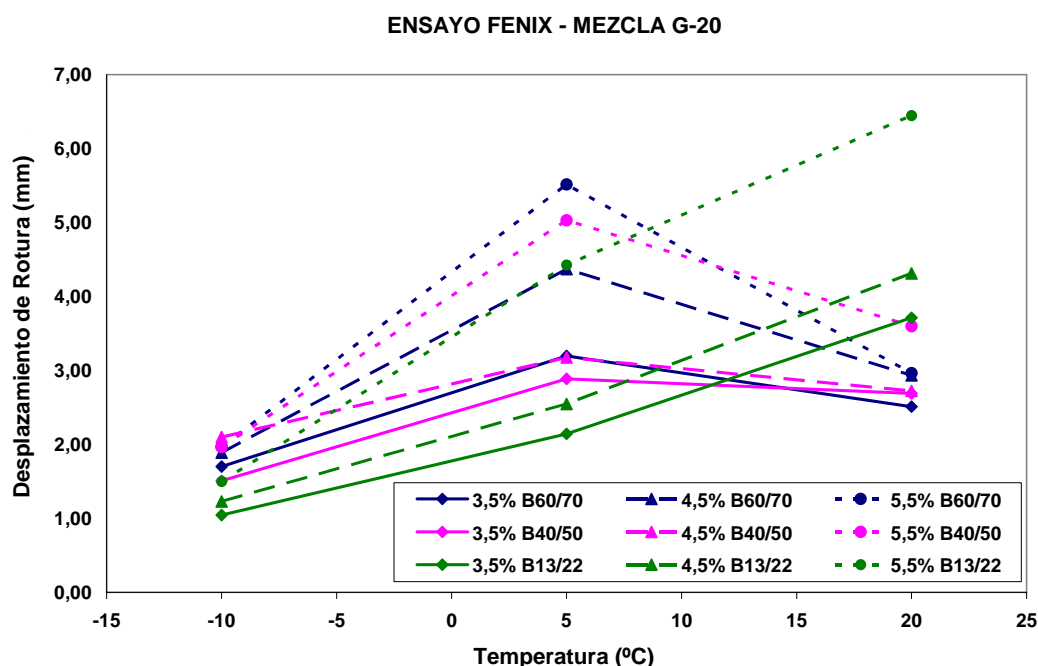


Fig. 4 - 25 Curvas desplazamiento de rotura – temperatura de ensayo, mezcla G-20

En la Fig. 4 - 26 se representa el índice de rigidez a tracción, I_{RT} , en función de la temperatura de ensayo, T° . Se observa que existe un aumento claro del parámetro evaluado a medida que descende la temperatura de ensayo, lo que demuestra que existe un aumento de la rigidez de las mezclas ensayadas. Para todas las temperaturas de ensayo, es la mezcla fabricada con un 3,5% de betún B13/22 la que registra los mayores valores de rigidez, y la mezcla con un 5,5% de betún B60/70 la que registra los menores valores de rigidez. En la gráfica se observa como a medida que aumenta el contenido de betún se produce un descenso de la rigidez en las mezclas, en el rango de temperaturas de ensayo considerado.

La Fig. 4 - 27 muestra el desplazamiento registrado una vez que la carga ha caído al 50% de su valor máximo, Δ_{mdp} , en función de la temperatura de ensayo, T° . Se observa que a bajas temperaturas, -10°C , las mezclas no presentan grandes diferencias en los desplazamientos, producto de su alta rigidez. Sin embargo, a las temperaturas de ensayo de 5°C y 20°C , se aprecian mayores diferencias en el desplazamiento, siendo los mayores valores para las mezclas fabricadas con ligantes más blandos. Para todas las mezclas evaluadas se observa que a medida que aumenta el contenido de ligante y la temperatura de ensayo, existe un aumento en el desplazamiento registrado, lo que indica una mayor capacidad para admitir deformación por parte de la mezcla.

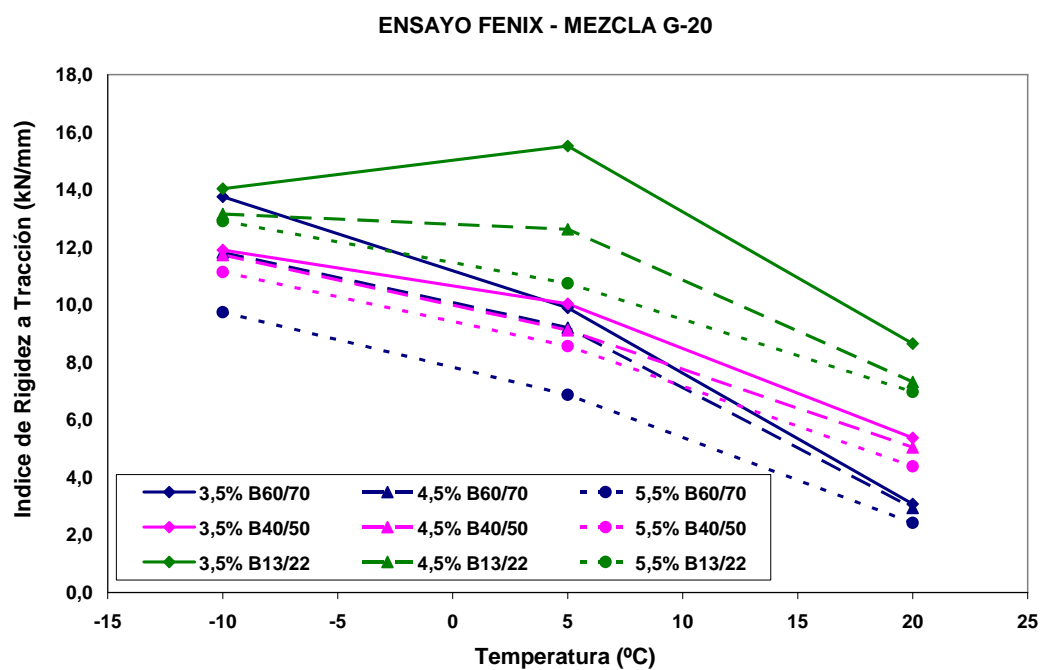
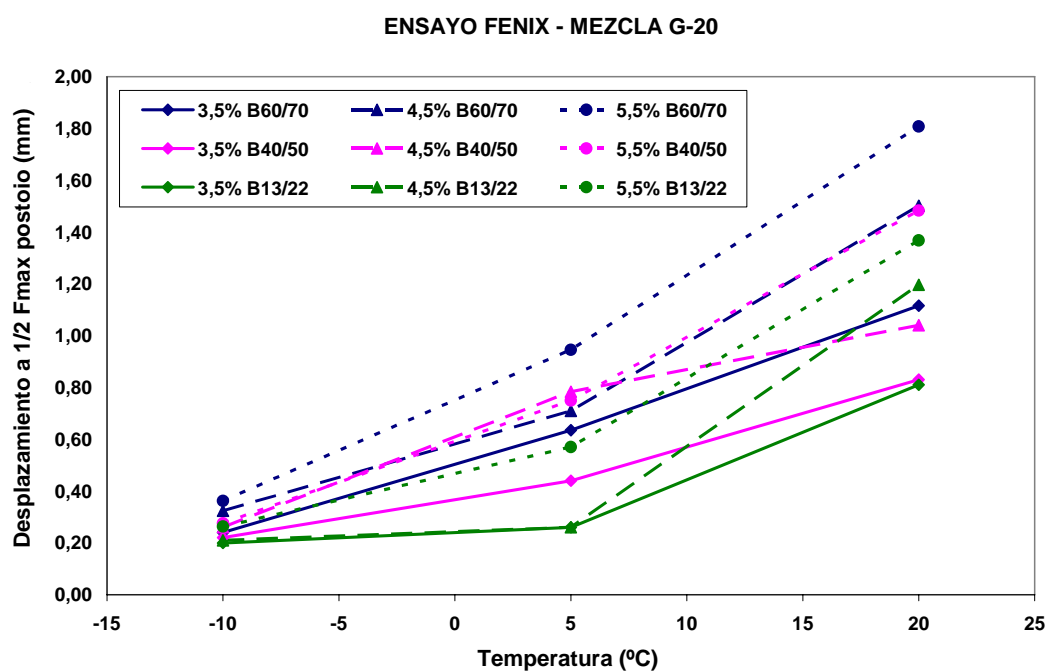


Fig. 4 - 26 Curvas índice de rigidez a tracción – temperatura de ensayo, mezcla G-20

Fig. 4 - 27 Curvas desplazamiento al 50%F_{max} postpico – temperatura de ensayo, mezcla G-20

La Fig. 4 - 28 representa la energía disipada en el proceso de fisuración, G_D , en función de la temperatura de ensayo, T^0 . En esta gráfica se observa que la energía disipada varía con la temperatura de ensayo, registrándose los mayores valores a la temperatura de ensayo de 5 °C, a excepción de las mezclas fabricadas con el betún B13/22 que presentan su mayor valor a la temperatura de 20 °C, ya que producto de la mayor viscosidad del betún utilizado, presentan un mejor desempeño a altas temperaturas. En esta figura se observa, también, que a medida que se aumenta el contenido de ligante se produce un aumento de la energía disipada durante el proceso de fisuración de la mezcla, prácticamente para todas las temperaturas consideradas.

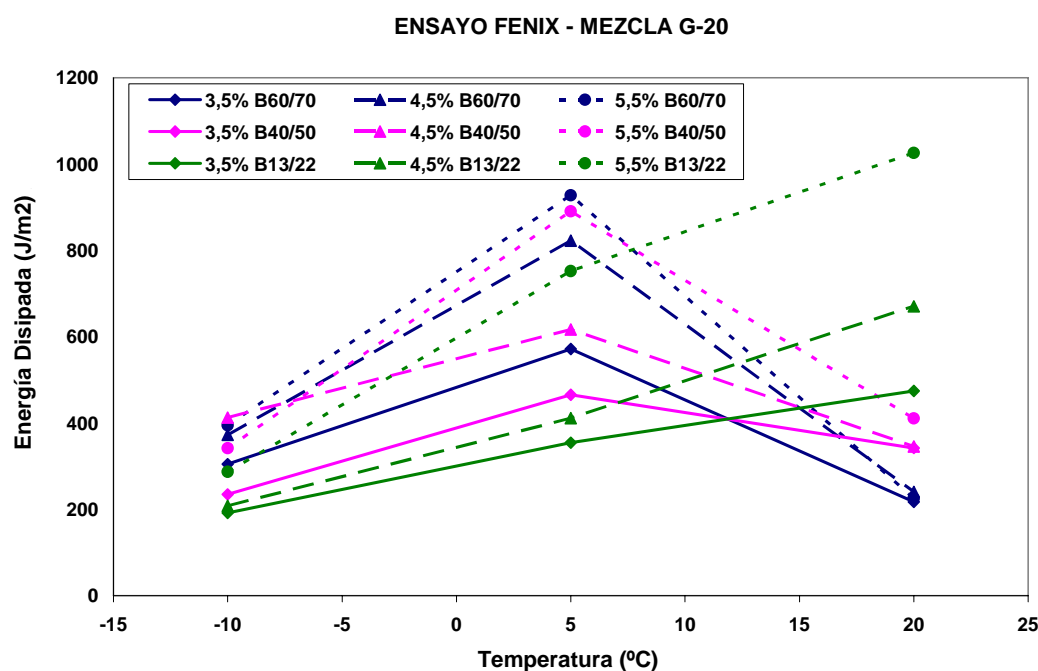


Fig. 4 - 28 Curvas energía disipada – temperatura de ensayo, mezcla G-20

El comportamiento del índice de energía, I_E , en función de la temperatura de ensayo, a medida que varía el porcentaje de ligante en la mezcla, es muy similar al presentado por la energía disipada, y se puede observar en la Fig. 4 - 29. Las mezclas confeccionadas con el ligante más viscoso, B13/22, presentaron los mayores índices de energía a la temperatura de 20 °C, mientras que a bajas temperaturas su valor fue inferior a los obtenidos en las mezclas fabricadas con los betunes de mayor penetración. Este parámetro también aumenta conforme aumenta el contenido de ligante en todas las mezclas evaluadas a las distintas temperaturas de ensayo.

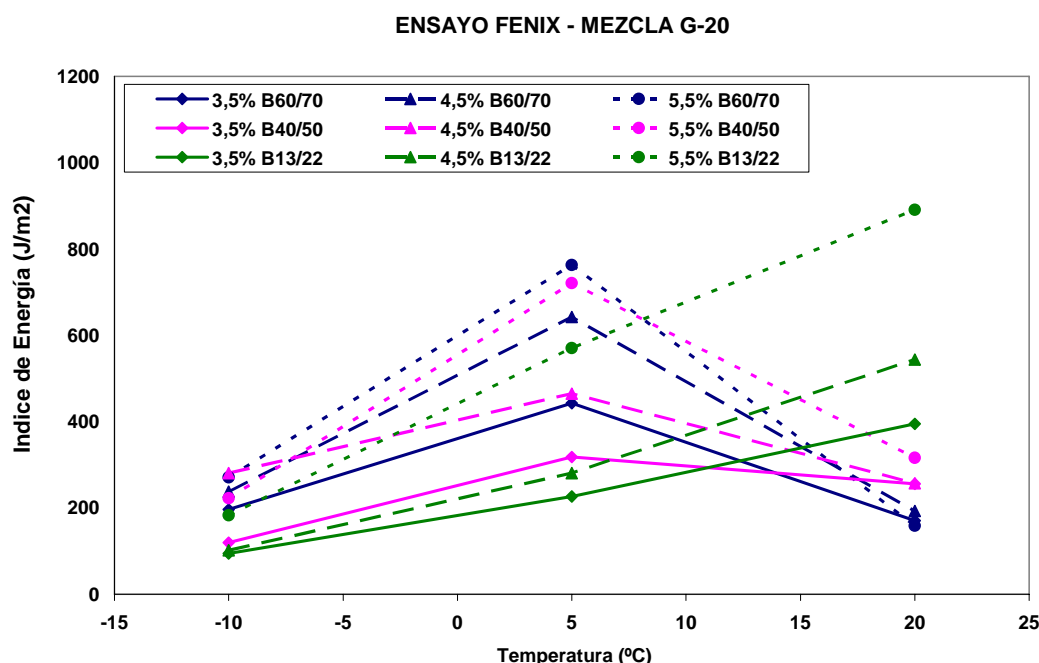


Fig. 4 - 29 Curvas índice de energía – temperatura de ensayo, mezcla G-20

La Fig. 4 - 30 muestra las superficies fracturadas de las probetas de mezcla G-20 del ensayo Fénix para las diferentes temperaturas de ensayo. En esta figura se puede observar que a bajas temperaturas, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, la fisura se produce en toda la matriz árido – betún, dejando áridos fracturados a medida que progresa la fisura. A temperaturas intermedias, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, se observa que la fisura se produce mayoritariamente en la interfase árido – betún, fracturando sólo algunos áridos a medida que ésta se propaga. Finalmente, a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, se observa que la fisura se produce prácticamente sólo en la interfase árido - betún.

En la Fig. 4 - 31, se representa el índice de tenacidad, I_T , en función de la temperatura de ensayo, T° . En esta gráfica se observa cómo varía la tenacidad de las mezclas fabricadas con diferentes tipos y contenidos de betún con la variación de la temperatura. A bajas temperaturas, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, las mezclas evaluadas se comportaron de forma similar, con un comportamiento frágil, observándose una leve mayor tenacidad en la mezcla con un 5,5 % de betún B60/70. La mezcla fabricada con el betún B13/22, para los contenidos de 3,5 y 4,5% de betún, y la mezcla fabricada con un 3,5% con el ligante B40/50, son las que presentaron un comportamiento más frágil.

A la temperatura intermedia de ensayo de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, se observa que la mezcla con el betún B60/70 presenta la mayor tenacidad para todos los contenidos de betún evaluados. A la temperatura de ensayo de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, la mezcla con el betún B60/70 presenta un comportamiento menos tenaz y se deforma con mayor facilidad, lo que se refleja en un descenso del índice de tenacidad respecto

al registrado a temperatura de 5 °C. A su vez, se observa que a la temperatura de 20 °C, la mezcla fabricada con el betún B13/22 es la que registra una mayor tenacidad, producto del buen desempeño que exhibe el betún señalado a altas temperaturas. En esta gráfica se observa que a medida que aumenta el contenido de ligante se produce un aumento de la tenacidad de la mezcla, para todas las temperaturas consideradas, pronunciándose más esta tendencia en las temperaturas de ensayo de 5 y 20 °C.

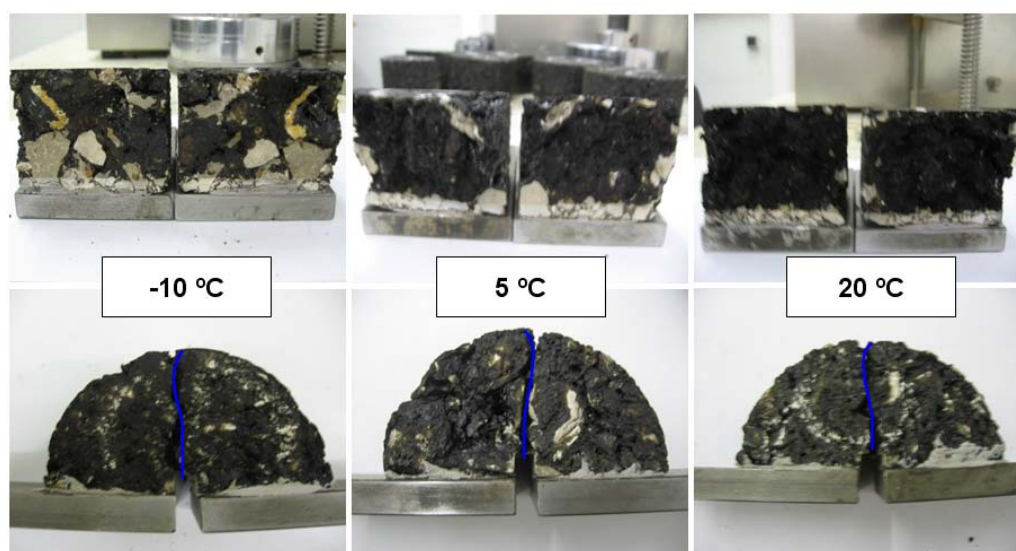


Fig. 4 - 30 Superficies de fractura a distintas temperaturas en probetas Fénix, mezcla G-20

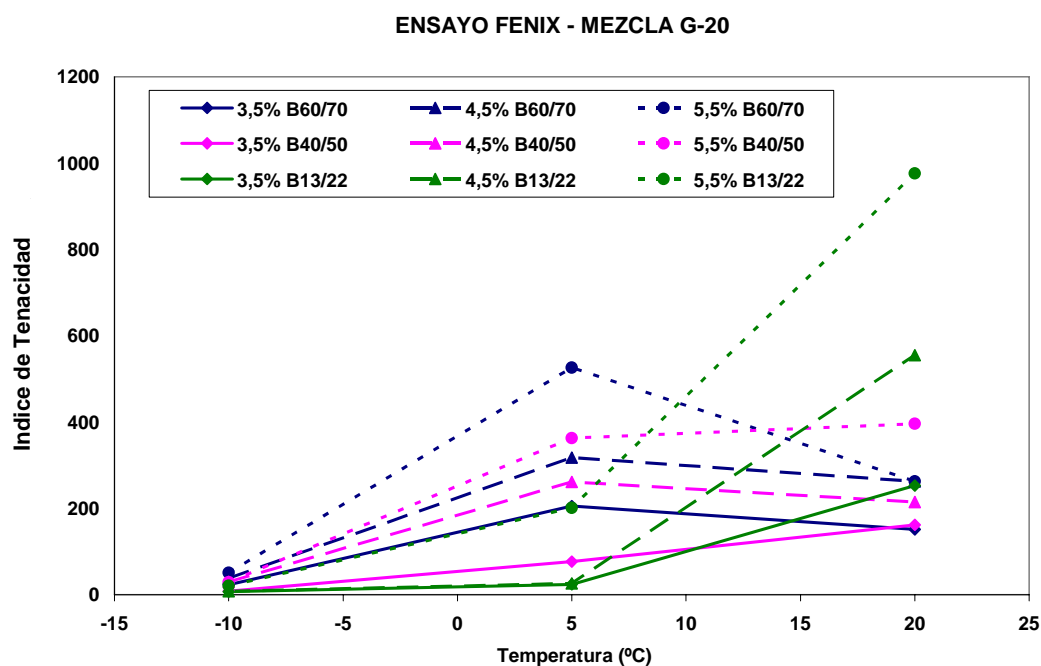


Fig. 4 - 31 Curvas índice de tenacidad – temperatura de ensayo, mezcla G-20

4.3.5 Influencia de la temperatura de compactación

La Fig. 4 - 32 muestra las curvas carga – desplazamiento de una mezcla S-20 ensayada mediante el procedimiento Fénix a una temperatura de 20 °C, para diferentes temperaturas de compactación de la mezcla. En la gráfica se puede observar que a medida que se incrementa la temperatura de compactación, los parámetros relacionados con la resistencia, rigidez, energía disipada y tenacidad de la mezcla aumentan, reflejando la influencia y la importancia de la temperatura de compactación de la mezcla en las propiedades mecánicas de ésta.

Lo señalado anteriormente confirma lo expuesto en diversos textos y artículos de investigación, sobre la importancia del control de la temperatura de compactación en las propiedades mecánicas de las mezclas como estabilidad, cohesión, resistencia a la tracción indirecta y tenacidad (Pérez et al., 1999; Pérez et al., 2006; Martínez, 2000; Asphalt Institute, 2007).

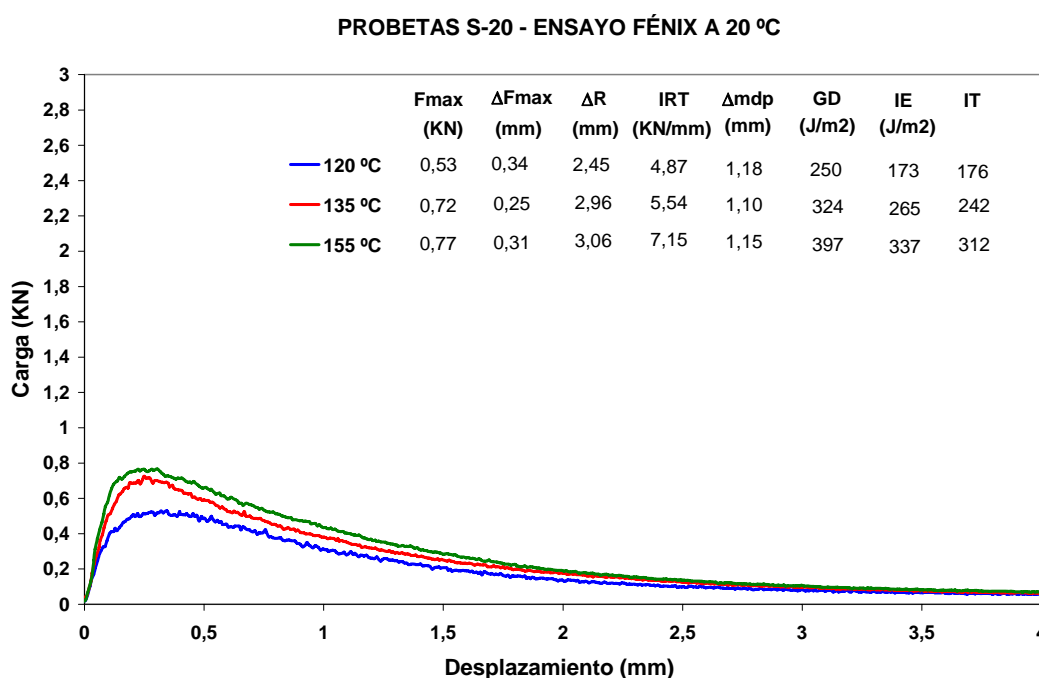


Fig. 4 - 32 Curvas carga – desplazamiento, mezclas S-20 a distintas temperaturas de compactación.

4.3.6 Influencia del material reciclado (RAP)

La influencia del material reciclado (RAP) en las mezclas bituminosas ha sido representada en la Fig. 4 - 33. En ella se aprecia que la mezcla con un 60% de RAP en su composición, S-20 R60, presenta una mayor resistencia, pero a su vez, una menor tenacidad que la mezcla fabricada con un 40% de RAP, S-12 R40, tal como señala el índice de tenacidad ilustrado, con valores de 124 y 260 (J/mm), respectivamente.

La incorporación de RAP en las mezclas evaluadas produce un aumento de rigidez y una disminución de la capacidad de admitir deformación por parte de la mezcla bituminosa, lo que queda manifiesto al analizar el índice de rigidez a tracción, I_{RT} , y el desplazamiento al 50% de la carga máxima, Δ_{mdp} , respectivamente.

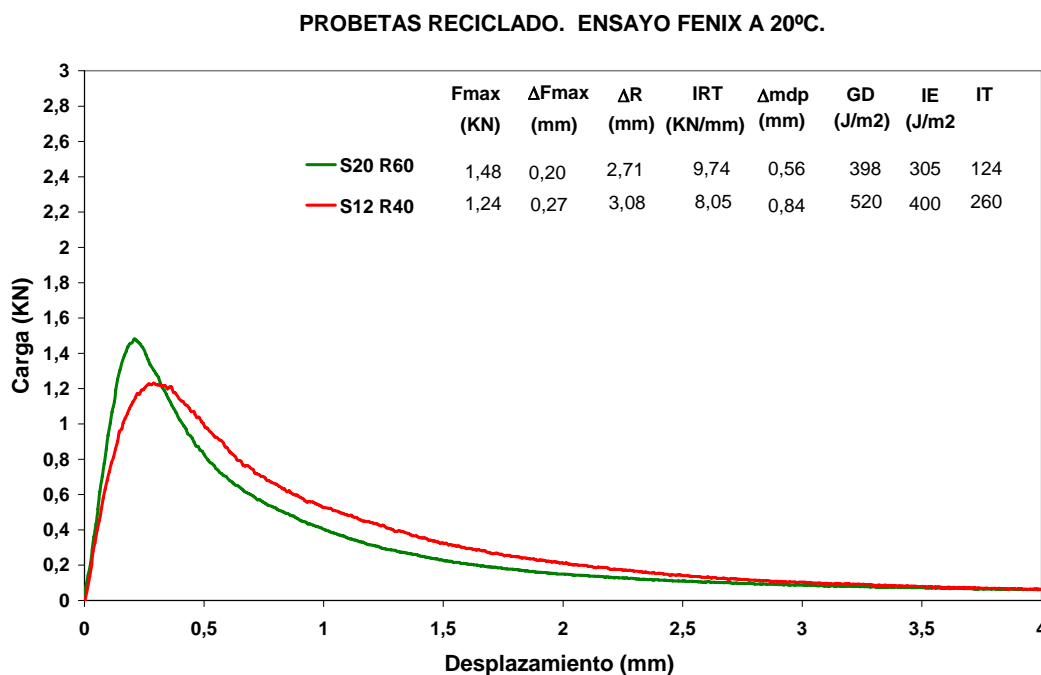


Fig. 4 - 33 Curvas carga – desplazamiento, mezclas recicladas S-20 R60 y S-12 R40

4.3 ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS DEL ENSAYO FÉNIX

En este apartado se presenta el análisis estadístico para establecer el grado de repetibilidad y sensibilidad que posee el ensayo Fénix.

Para analizar la repetibilidad que posee el ensayo Fénix, se ha realizado un estudio de los coeficientes de variación de los principales parámetros entregados por el ensayo. Los siguientes parámetros entregados por el ensayo Fénix fueron definidos como principales y fueron analizados en este estudio estadístico:

- Carga máxima, F_{max}
- Índice de rigidez a tracción, I_{RT}
- Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp}
- Energía disipada en el proceso de fisuración, G_D



Para analizar la sensibilidad del ensayo Fénix, se ha realizado un análisis de varianza ANOVA, de los mismos parámetros señalados anteriormente, relacionados con las variables estudiadas: tipo y contenido de ligante en la mezcla, y temperatura de ensayo.

En ambos análisis se han evaluado todos los resultados de series de tres probetas, para una velocidad de aplicación de carga de 1 mm/min.

4.3.1 Estudio de la repetibilidad del ensayo Fénix

Los coeficientes de variación obtenidos del análisis de repetibilidad han sido presentados de acuerdo a la temperatura a la que fueron ensayadas las probetas Fénix y se pueden observar desde la **Tabla 4 - 3** a la **Tabla 4 - 6**.

Para la carga máxima, F_{max} , se observan valores del coeficientes de variación bastante buenos, indicando una variación global promedio de 8,5% para todas las mezclas evaluadas a las distintas temperaturas de ensayo, apreciándose una tendencia a aumentar los valores a medida que aumenta la temperatura.

Para el índice de rigidez a tracción, I_{RT} , se observa un coeficiente de variación promedio de 12,3%, lo que supone una buena repetibilidad para este parámetro. Al igual que para la carga máxima, se observa que los coeficientes de variación aumentan al aumentar la temperatura de ensayo.

En la evaluación de la repetibilidad del desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , se observan coeficientes de variación bastante similares para las tres temperaturas consideradas, con un valor promedio de 11,9%, lo que indica una buena repetibilidad del parámetro calculado.

Finalmente, para la energía disipada, G_D , se observa un coeficiente de variación de 16%. En general, los coeficientes de variación para este parámetro del ensayo Fénix, comparado con los señalados en la literatura para las geometrías de los ensayos SE(B) (3-28%), DC(T) (4-25%) y SCB (15-34%), se encuentra en el rango de variabilidad (Wagoner, 2005a).



Tabla 4 - 3 Coeficientes de Variación de los Parámetros Fénix, Temperatura de Ensayo -10 °C

Tipo de mezcla	Tipo de betún	Contenido de betún (%)	Carga Máxima Fmax (KN)	Índice Rigidez a Tracción IRT (KN/mm)	Desplazamiento 50% Fmax dp Δmdp (mm)	Energía Disipada GD (J/m2)
S-20	B60/70	4,3	4,1	4,9	7,1	10,2
	B40/50	4,3	3,3	7,0	6,4	9,9
	B13/22	4,3	4,7	5,1	8,4	15,6
	BM3c	4,3	7,4	8,3	7,7	8,4
G-20	B60/70	3,5	4,9	9,1	16,1	18,9
	B60/70	4,5	15,7	17,6	2,3	10,0
	B60/70	5,5	6,6	6,0	13,2	21,2
	B40/50	3,5	3,4	10,3	23,2	31,7
	B40/50	4,5	6,8	7,1	12,4	36,0
	B40/50	5,5	0,4	8,7	6,5	8,3
	B13/22	3,5	9,4	8,3	15,4	33,2
	B13/22	4,5	7,7	1,8	12,5	16,8
	B13/22	5,5	10,1	7,0	10,7	17,4
Promedio			6,5	7,8	10,9	18,3

Tabla 4 - 4 Coeficientes de Variación de los Parámetros Fénix, Temperatura de Ensayo 5 °C

Tipo de mezcla	Tipo de betún	Contenido de betún (%)	Carga Máxima Fmax (KN)	Índice Rigidez a Tracción IRT (KN/mm)	Desplazamiento 50% Fmax dp Δmdp (mm)	Energía Disipada GD (J/m2)
S-20	B60/70	4,3	6,1	2,7	13,5	12,8
	B40/50	4,3	2,4	0,4	3,5	2,3
	B13/22	4,3	0,9	4,7	7,3	31,9
	BM3c	4,3	12,9	8,6	13,4	4,3
G-20	B60/70	3,5	12,8	15,7	9,3	2,6
	B60/70	4,5	6,6	14,9	15,9	24,0
	B60/70	5,5	4,8	17,7	5,6	20,5
	B40/50	3,5	6,7	12,6	11,8	20,2
	B40/50	4,5	10,3	24,7	9,2	19,3
	B40/50	5,5	11,0	5,4	10,0	27,8
	B13/22	3,5	10,9	0,7	18,9	2,3
	B13/22	4,5	8,1	13,2	23,0	16,9
	B13/22	5,5	12,9	5,5	11,5	6,2
Promedio			8,2	9,7	11,8	14,7



Tabla 4 - 5 Coeficientes de Variación de los Parámetros Fénix, Temperatura de Ensayo 20 °C

Tipo de mezcla	Tipo de betún	Contenido de betún (%)	Carga Máxima Fmax (KN)	Índice Rigidez a Tracción IRT (KN/mm)	Desplazamiento 50% Fmax dp Δmdp (mm)	Energía Disipada GD (J/m2)
S-20	B60/70	4,3	13,4	14,7	30,9	12,3
	B40/50	4,3	8,9	1,9	17,9	7,2
	B13/22	4,3	8,0	15,1	4,4	18,4
	BM3c	4,3	9,0	18,0	6,1	10,2
G-20	B60/70	3,5	21,9	49,1	9,8	24,9
	B60/70	4,5	10,1	29,2	9,7	28,5
	B60/70	5,5	9,1	30,5	20,2	17,5
	B40/50	3,5	3,3	18,2	8,0	3,5
	B40/50	4,5	9,6	14,7	9,5	16,0
	B40/50	5,5	14,6	3,1	17,0	11,3
	B13/22	3,5	10,7	29,3	10,8	10,3
	B13/22	4,5	10,8	8,3	23,0	22,7
	B13/22	5,5	10,1	19,8	2,5	13,9
Promedio			10,7	19,4	13,1	15,1

Tabla 4 - 6 Valores Promedio de los Coeficientes de Variación de los Parámetros Fénix

Carga Máxima Fmax (KN)	Índice Rigidez a Tracción IRT (KN/mm)	Desplazamiento 50% Fmax dp Δmdp (mm)	Energía Disipada GD (J/m2)
8,5	12,3	11,9	16,0

4.3.2 Estudio de la sensibilidad del ensayo Fénix

En este apartado se presentan los resultados del análisis estadístico realizado a los principales parámetros obtenidos en el ensayo Fénix con la finalidad de determinar la sensibilidad del ensayo.

Para realizar este análisis estadístico, se ha escogido el análisis de varianza ANOVA, puesto que éste permite comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos, y determinar así, para cada parámetro calculado, la sensibilidad del ensayo. El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global observada en los grupos de datos numéricos a comparar.



Lo que se desea determinar mediante el análisis de varianza es la sensibilidad de los parámetros calculados resultantes del ensayo propuesto, frente a las variables evaluadas. Por lo tanto, se ha evaluado la sensibilidad del ensayo frente a los resultados obtenidos de los parámetros principales ya definidos.

En una primera etapa se ha analizado para la mezcla S-20 el efecto del tipo de ligante y la temperatura de ensayo sobre los parámetros principales obtenidos en el ensayo Fénix. Para cada parámetro evaluado se ha realizado un análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo. Para estos análisis los factores fueron: tipo de ligante y temperatura de ensayo. El factor tipo de ligante, constó de cuatro niveles correspondientes a los cuatro ligantes analizados (B60/70, B40/50, B13/22 y BM3c) con un total de 9 datos para cada nivel, mientras que el factor temperatura de ensayo, constó de tres niveles (-10, 5 y 20 °C) con un total de 12 datos para cada nivel.

Las hipótesis nulas testeadas en esta primera etapa en los análisis de varianza ANOVA establecen que los factores de análisis tipo de ligante y temperatura de ensayo, no influyen en el resultado de ninguno de los parámetros calculados en el ensayo Fénix: carga máxima, F_{\max} , Índice de rigidez a tracción, I_{RT} , desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , y energía disipada, G_D .

Los resultados del análisis de varianza ANOVA realizado en esta primera etapa para los factores tipo de ligante y temperatura de ensayo se observan desde la **Tabla 4 - 7** a la **Tabla 4- 10**.

La primera columna de cada tabla hace referencia al origen de las variaciones y corresponden a las fuentes de variación o interferencia en la variable que se desea estudiar. El primer origen corresponde al factor “tipo de ligante” que cuenta con cuatro niveles y por lo tanto con 3 grados de libertad (los grados de libertad acostumbran a ser el número de niveles menos uno). El siguiente origen de las variaciones corresponde al factor “temperatura de ensayo”, que cuenta con tres niveles y por lo tanto con 2 grados de libertad. La siguiente fuente de variación es la interacción entre los dos factores, la cual corresponde al comportamiento diferencial de un factor respecto el otro a según que niveles, lo que en nuestro análisis significaría que un factor, por ejemplo el tipo de betún, puede responder de modo muy distinto según cual sea la temperatura de ensayo utilizada (entendiéndose por responder que el parámetro evaluado puede alcanzar valores distintos). Para esta última fuente de variación, los grados de libertad corresponden al producto de los grados de libertad de cada uno de los factores por separado.

En la quinta columna de cada tabla se encuentra la “razón F”, parámetro que sirve para determinar la significación estadística, es decir, cuando la razón F calculada es mayor que la obtenida para cierto nivel de probabilidad (convencionalmente 0,05 ó 0,01; en este análisis se



utilizó el nivel de 0,05), se rechaza la hipótesis nula establecida en el análisis. Otra forma de interpretación de estos resultados es mediante el parámetro señalado en la sexta columna, “probabilidad”, puesto que si el valor señalado es igual o menor que el nivel de significación establecido (para este caso 0,05), se rechaza la hipótesis nula establecida.

Al interpretar los resultados obtenidos del análisis de varianza ANOVA en esta primera etapa, para los parámetros establecidos como principales del ensayo Fénix, carga máxima, F_{\max} , índice de rigidez a tracción, I_{RT} , desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , y energía disipada, G_D , se observa que los valores de probabilidad obtenidos, tanto para los dos factores analizados, tipo de ligante y temperatura de ensayo, como para la interacción entre éstos, son significativamente inferiores al valor del nivel de 0,05. Esto significa que se rechaza la hipótesis nula, y por lo tanto que los factores analizados, tipo de ligante, temperatura de ensayo y la interacción entre éstos, si influyen significativamente en los parámetros calculados en el ensayo Fénix, demostrando así la sensibilidad del ensayo frente a las variables de análisis tipo de ligante y temperatura de ensayo.

Tabla 4 - 7 Análisis ANOVA para comparar en efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo en la carga máxima, F_{\max}

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tipo de ligante	3,59308826	3	1,19769609	72,22	$3,71 \cdot 10^{-12}$	3,0088
T° de ensayo	27,7374899	2	13,8687449	836,32	$6,42 \cdot 10^{-23}$	3,4028
Interacción	3,94517939	6	0,6575299	39,65	$2,67 \cdot 10^{-11}$	2,5081

Tabla 4 - 8 Análisis ANOVA para comparar en efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo en el índice rigidez a tracción, I_{RT}

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tipo de ligante	42,3764203	3	14,1254734	24,01	$2,10 \cdot 10^{-07}$	3,0088
T° de ensayo	363,596169	2	181,798084	308,95	$7,46 \cdot 10^{-18}$	3,4028
Interacción	45,8176277	6	7,63627128	12,98	$1,63 \cdot 10^{-06}$	2,5082

Tabla 4 - 9 Análisis ANOVA para comparar en efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo en el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp}

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tipo de ligante	1,15921999	3	0,38640666	32,44	$1,31 \cdot 10^{-08}$	3,0088
T° de ensayo	3,69277761	2	1,8463888	155,03	$1,89 \cdot 10^{-14}$	3,4028
Interacción	0,72217713	6	0,12036286	10,11	$1,34 \cdot 10^{-05}$	2,5082

**Tabla 4 - 10 Análisis ANOVA para comparar en efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo en la energía disipada, G_D**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tipo de ligante	132414,178	3	44138,0594	20,42	$8,59 \cdot 10^{-07}$	3,0088
T° de ensayo	337020,377	2	168510,188	77,95	$3,18 \cdot 10^{-11}$	3,4028
Interacción	167925,278	6	27987,5463	12,95	$1,66 \cdot 10^{-06}$	2,5082

Una vez determinada la sensibilidad del ensayo Fénix frente a las variables tipo de ligante y temperatura de ensayo, se llevó a cabo una segunda etapa de análisis estadístico consistente en estudiar el efecto del contenido de ligante y la temperatura de ensayo en mismos los parámetros del ensayo Fénix analizados previamente.

Para ello, se realizó un análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo para cada tipo de ligante evaluado en la mezcla G-20 (B60/70, B40/50 y B13/22). Para estos análisis los factores fueron: contenido de ligante y temperatura de ensayo. El factor contenido de ligante constó de tres niveles (3,5, 4,5 y 5,5%) con un total de 9 datos para cada nivel, y el factor temperatura de ensayo constó de tres niveles (-10, 5 y 20 °C) con un total de 9 datos para cada nivel. Para estos análisis efectuados a cada ligante evaluado, las hipótesis nulas señalan que estos factores no influyen en ninguno de los principales parámetros calculados en el ensayo Fénix.

En la **Tabla 4 - 11** se recogen los resultados del análisis de varianza para cada ligante evaluado sobre la carga máxima, F_{max} . Al analizar los resultados se observa que en los tres ligantes analizados, la razón F para el factor contenido de ligante, es menor que el valor crítico para F, mientras que para el factor temperatura de ensayo, es mayor. Esto nos indica que el factor contenido de ligante no influye significativamente en los resultados obtenidos para la carga máxima para una temperatura de ensayo determinada. Sin embargo, el factor temperatura de ensayo si influye significativamente en los resultados de la carga máxima. Esto queda reflejado en la **Fig. 4 - 22**, en la que se observa que no existe una tendencia clara de la carga máxima respecto a la variación del contenido de ligante en las temperaturas evaluadas, pero si se aprecia una tendencia a disminuir la carga máxima a medida que se incrementa la temperatura de ensayo. Por otro lado, el valor de la razón F para la interacción de los factores es bajo, lo que indica que la interacción entre los factores contenido de ligante y temperatura de ensayo no influye en la carga máxima.

**Tabla 4 - 11 Análisis ANOVA para comparar el efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo en la carga máxima, F_{max}**

Tipo de betún	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
B60/70	Cont. de ligante	0,11979	2	0,0599	1,8941	0,1792	3,5546
	Tº de ensayo	19,6164	2	9,8082	310,172	$1,13 \cdot 10^{-14}$	3,5546
	Interacción	0,08710	4	0,02178	0,6886	0,6092	2,9277
B40/50	Cont. de ligante	0,10740	2	0,05370	3,3447	0,05819	3,5546
	Tº de ensayo	12,3754	2	6,1877	385,393	$1,68 \cdot 10^{-15}$	3,5546
	Interacción	0,20203	4	0,05051	3,1458	0,03985	2,9277
B13/22	Cont. de ligante	0,12007	2	0,06003	1,56288	0,23668	3,5546
	Tº de ensayo	9,18659	2	4,59329	119,574	$4,035 \cdot 10^{-11}$	3,5546
	Interacción	0,0710	4	0,01776	0,4624	0,76242	2,9277

Los resultados del análisis de varianza ANOVA para cada ligante evaluado sobre el índice de rigidez a tracción, I_{RT} , han sido recogidos en la **Tabla 4 - 12**. Al analizar los resultados se observa que para los ligantes analizados B60/70 y B13/22, la razón F de los factores contenido de ligante y temperatura de ensayo, es mayor que el valor crítico para F, lo que indica que los factores señalados si influyen significativamente en el índice de rigidez a tracción, mientras que para el ligante B40/50, la razón F determinada para el factor contenido de ligante, al ser menor que el valor F crítico, indica que este factor no influye significativamente en el parámetro considerado. Esto queda reflejado en la **Fig. 4 - 26**, en la que se observa que no existe una diferencia tan marcada del I_{RT} para cada contenido del ligante B40/50 a las diferentes temperaturas ensayadas, como la que se aprecia con los otros dos ligantes evaluados.

Tabla 4 - 12 Análisis ANOVA para comparar el efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo en el índice de rigidez a tracción, I_{RT}

Tipo de betún	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
B60/70	Cont. de ligante	30,3886	2	15,19429	8,7761	0,002186	3,5546
	Tº de ensayo	372,317	2	186,1587	107,524	$9,78 \cdot 10^{-11}$	3,5546
	Interacción	9,55347	4	2,38837	1,3795	0,28044	2,9277
B40/50	Cont. de ligante	5,21645	2	2,60822	2,0312	0,160171	3,5546
	Tº de ensayo	205,122	2	102,5610	79,8704	$1,12 \cdot 10^{-9}$	3,5546
	Interacción	0,57360	4	0,143399	0,11167	0,97681	2,9277
B13/22	Cont. de ligante	29,857	2	14,92852	10,0682	0,0011625	3,5546
	Tº de ensayo	183,412	2	91,70576	61,8489	$8,61 \cdot 10^{-9}$	3,5546
	Interacción	11,6488	4	2,912200	1,96407	0,14342	2,9277



En la **Tabla 4 - 13** se recogen los resultados del análisis de varianza ANOVA para cada ligante evaluado sobre el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} . En el análisis de los resultados se observa que, en los tres ligantes evaluados, el valor de la razón F tanto para el factor contenido de ligante como para el factor temperatura de ensayo, es mayor al valor crítico de F. Esto indica que para cualquiera de los dos factores se puede rechazar la hipótesis nula y establecer que los valores obtenidos para el parámetro evaluado son significativamente diferentes frente a los factores analizados. A su vez, se observa que el valor de F para la interacción de los factores es superior al valor F crítico para todos los ligantes evaluados, lo que significa que, para estos ligantes, la interacción entre el factor contenido de ligante y la temperatura de ensayo sí influye en el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico.

Tabla 4 - 13 Análisis ANOVA para comparar el efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo en el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp}

Tipo de betún	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
B60/70	Cont. de ligante	0,63050	2	0,31524783	14,9392692	0,00015003	3,5546
	T° de ensayo	6,23175	2	3,11587352	147,658031	$6,8172 \cdot 10^{-12}$	3,5546
	Interacción	0,27066	4	0,06766497	3,20657304	0,03744328	2,9277
B40/50	Cont. de ligante	0,53353	2	0,26676257	25,1825568	$6,0805 \cdot 10^{-06}$	3,5546
	T° de ensayo	3,37320	2	1,68659835	159,215963	$3,5923 \cdot 10^{-12}$	3,5546
	Interacción	0,35217	4	0,0880424	8,31125927	0,00055662	2,9277
B13/22	Cont. de ligante	0,43643	2	0,21821263	20,5591181	$2,2488 \cdot 10^{-05}$	3,5546
	T° de ensayo	4,21398	2	2,10698859	198,512004	$5,4299 \cdot 10^{-13}$	3,5546
	Interacción	0,25495	4	0,06373762	6,00510265	0,0029841	2,9277

Los resultados del análisis de varianza ANOVA para la energía disipada se presentan en la **Tabla 4 - 14**. En esta tabla se observa que, en los tres ligantes analizados, la razón F tanto para el factor contenido de ligante como para el factor temperatura de ensayo, es mayor al valor crítico para F, indicando que para estos factores se puede rechazar la hipótesis nula y establecer que los valores obtenidos para la energía disipada sí son significativamente diferentes frente a los factores analizados. A su vez, se observa que el valor de F para la interacción de los factores es superior al valor F crítico en los ligantes B40/50 y B13/22, lo que indica que, para estos ligantes, la interacción entre el factor contenido de ligante y la temperatura de ensayo sí influyen en la energía disipada.

**Tabla 4 - 14 Análisis ANOVA para comparar el efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo en la energía disipada, G_D**

Tipo de betún	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
B60/70	Cont. de ligante	112047,73	2	56023,865	5,2324	0,01616863	3,5546
	T° de ensayo	1465290,22	2	732645,111	68,4263	$3,87 \cdot 10^{-09}$	3,5546
	Interacción	103244,732	4	25811,183	2,4107	0,08713	2,9277
B40/50	Cont. de ligante	181021,948	2	90510,974	6,9033	0,00595399	3,5546
	T° de ensayo	581451,238	2	290725,619	22,1736	$1,39 \cdot 10^{-05}$	3,5546
	Interacción	154442,805	4	38610,7014	2,9448	0,04911	2,9277
B13/22	Cont. de ligante	588307,522	2	294153,761	45,0689	$9,81 \cdot 10^{-08}$	3,5546
	T° de ensayo	1104949,06	2	552474,53	84,6477	$6,99 \cdot 10^{-10}$	3,5546
	Interacción	173596,074	4	43399,0185	6,6494	0,00180975	2,9277

En general, de acuerdo a los resultados de los análisis estadísticos realizados a los principales parámetros obtenidos del nuevo procedimiento desarrollado en esta Tesis Doctoral, se puede establecer que el ensayo Fénix es un procedimiento que tiene una buena repetibilidad y sensibilidad frente a las variables de estudio.

Lo expuesto anteriormente queda reflejado en la **Tabla 4 - 15**, la cual resume la sensibilidad de los parámetros Fénix evaluados en función de los factores analizados en este punto.

Tabla 4 - 15 Resumen de sensibilidad de los parámetros Fénix

Análisis estadístico ANOVA		Carga Máxima Fmax (KN)	Índice Rigidez a Tracción IRT (KN/mm)	Desplazamiento 50% Fmax dp Δmdp (mm)	Energía Disipada GD (J/m2)
Efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo					
Tipo de ligante		Si	Si	Si	Si
T° de ensayo		Si	Si	Si	Si
Interacción		Si	Si	Si	Si
Efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo					
B60/70	Cont. de ligante	No	Si	Si	Si
	T° de ensayo	Si	Si	Si	Si
	Interacción	No	Si	No	No
B40/50	Cont. de ligante	No	No	Si	Si
	T° de ensayo	Si	Si	Si	Si
	Interacción	Si	No	Si	Si
B13/22	Cont. de ligante	No	Si	Si	Si
	T° de ensayo	Si	Si	Si	Si
	Interacción	No	No	Si	Si



CAPÍTULO 5

Predicción del Comportamiento a Fatiga de las Mezclas Mediante el Ensayo Fénix



5.1 INTRODUCCIÓN

El fallo por fatiga es considerado uno de los más importantes y frecuentes en las mezclas asfálticas y ocurre generalmente cuando el pavimento ha sido solicitado hasta el límite de su vida por repetidas aplicaciones de ejes de carga. Durante el proceso de fatiga de una mezcla bituminosa se produce una disminución de la resistencia junto con una degradación continua del material, provocada por la formación de micro y macrofisuras, las cuales, una vez unidas entre ellas, producen el fallo total de mezcla.

Tradicionalmente, el comportamiento a fatiga de las mezclas se ha representado por medio de su ley de fatiga, la cual se determina a través de los parámetros resultantes de ensayos cíclicos, aplicando un determinado criterio de fallo. La importancia de la ley de fatiga radica en que es una herramienta fundamental en el dimensionamiento de firmes mediante los actuales métodos de diseño mecanicistas.

El problema que se presenta es que, debido a la complejidad de los ensayos cíclicos que evalúan la respuesta de las mezclas bituminosas a la fatiga, esta propiedad no es considerada habitualmente durante la etapa de diseño. Por otra parte, la complicada microestructura de las mezclas, relacionada con los distintos tamaños de áridos, su interfase árido-ligante, el comportamiento reológico y tipologías de los betunes empleados, el espesor de recubrimiento del betún, la susceptibilidad térmica de las mezclas y la distribución e interconectividad de los huecos existentes en el material, dan como resultado que las propiedades a fatiga de una mezcla bituminosa sean muy complicadas de predecir.

Como se mostró en el estado del conocimiento desarrollado en esta Tesis Doctoral, en estudios previos realizados en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, se investigó el proceso de fatiga de las mezclas bituminosas en probetas prismáticas, concretamente con el ensayo CTD, mediante la aplicación de cargas cíclicas. Estos estudios mostraron, por una parte, la relación existente entre la pendiente de la ley de fatiga y el módulo dinámico obtenido de los ensayos a fatiga. A su vez, establecieron que la deformación de fallo a fatiga de las mezclas bituminosas dependía del tipo de mezcla, siendo mayor en las mezclas más dúctiles y menor en las mezclas más frágiles, estableciéndose una relación entre los valores de deformación de rotura a fatiga y la ordenada al origen de la ley de fatiga.

Basándose en los resultados de las investigaciones señaladas, en este capítulo se pretende establecer un mecanismo que permita predecir el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas por medio un procedimiento más simple. Este procedimiento se basaría en la aplicación del ensayo Fénix y en la relación existente entre los parámetros de deformación y



rigidez determinados por esta metodología y los determinados por el ensayo fatiga a flexotracción en tres puntos, recogido en la normativa europea UNE-EN 12697-24 (Anexo C).

Para ello, a lo largo de este capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos en la campaña experimental destinada a determinar las características de fatiga de las mezclas evaluadas y el grado de correlación existente entre los parámetros de rigidez y deformación del ensayo Fénix y los parámetros resultantes del ensayo a fatiga a flexotracción en tres puntos.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo 3, en una segunda etapa experimental se ha determinado, a diferentes temperaturas, el comportamiento a fatiga de una serie de mezclas comúnmente utilizadas en capas de base en firmes flexibles, mediante el ensayo a fatiga a flexotracción en tres puntos, realizado a desplazamiento controlado. Posteriormente, las mismas mezclas fueron ensayadas en las mismas condiciones de temperatura mediante el nuevo procedimiento de ensayo, el ensayo Fénix.

5.2.1 Análisis del comportamiento a fatiga de las mezclas evaluadas

En el estudio experimental realizado, se ha evaluado la respuesta a fatiga de mezclas rígidas, confeccionadas con el betún de baja penetración B13/22 o con un alto porcentaje de RAP, así como de mezclas más flexibles confeccionadas con un betún de mayor penetración, B60/70. Los ensayos experimentales se efectuaron a diferentes temperaturas, 5 y 20 °C, representándose así diferentes condiciones ambientales a las que puede estar sometido un firme durante su periodo en servicio.

El proceso de fatiga de las mezclas más rígidas respecto al de una mezcla más deformable, para una temperatura de 20 °C, se observa en la Fig. 5 - 1, en la que se ha representado la evolución de la deformación unitaria en función del número de ciclos de cargas aplicados.

Para las mezclas más rígidas, como son la mezcla confeccionada con el ligante más duro, B13/22 y la mezcla fabricada con una alta tasa de material fresado, S-20 R60, se presenta un nivel de deformación inicial más bajo que para la mezcla más flexible, fabricada con el ligante de mayor penetración, B60/70.

En la figura puede observarse que para un determinado número de ciclos, el nivel de deformación unitaria aumenta rápidamente en pocos ciclos de carga, induciendo la fisura en la probeta hasta el fallo de ésta. Este nivel de deformación, ya descrito anteriormente en varios estudios realizados en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña,

llamado deformación crítica, que es independiente del nivel de desplazamiento del pistón de carga impuesto en el ensayo de fatiga, es mayor en la mezcla más deformable.

La evolución del módulo dinámico con los ciclos de aplicación de carga, para la temperatura de 20 °C, se representa en la Fig. 5 - 2. Como puede observarse, las mezclas más rígidas, confeccionadas con el betún B13/22 o con altas tasas de RAP, presentan módulos dinámicos iniciales entre 7.500 y 11.500 MPa, superiores a los de la mezcla más deformable, fabricada con el ligante B60/70, que obtuvo valores cercanos a los 2.500 MPa. Así mismo, se observa que las curvas de evolución del módulo dinámico muestran un rápido descenso a partir del ciclo en que la probeta alcanza el valor de deformación crítica, ilustrado en la Fig. 5 - 1. Adicionalmente, se aprecia que las pendientes de las curvas de evolución del módulo dinámico son mayores para las mezclas más rígidas; en cambio, para la mezcla más deformable, fabricada con el betún B60/70, la pendiente es más tendida, presentando una degradación más paulatina.

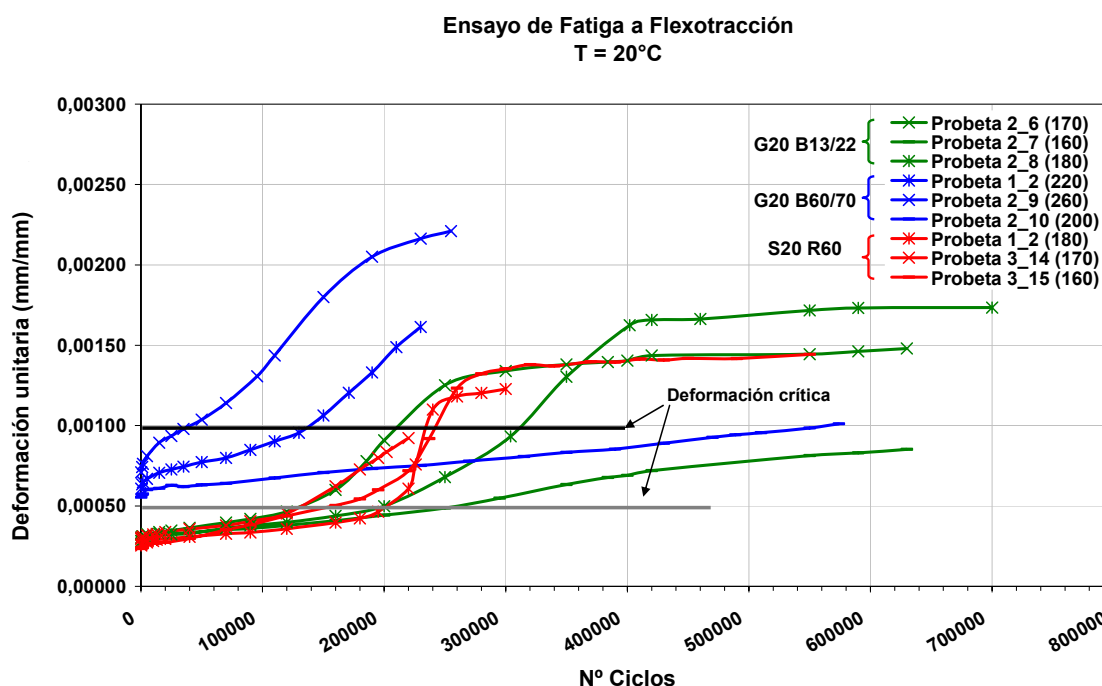


Fig. 5 - 1 Curvas de deformación unitaria versus número de ciclos, ensayo a fatiga a flexotracción, 20 °C

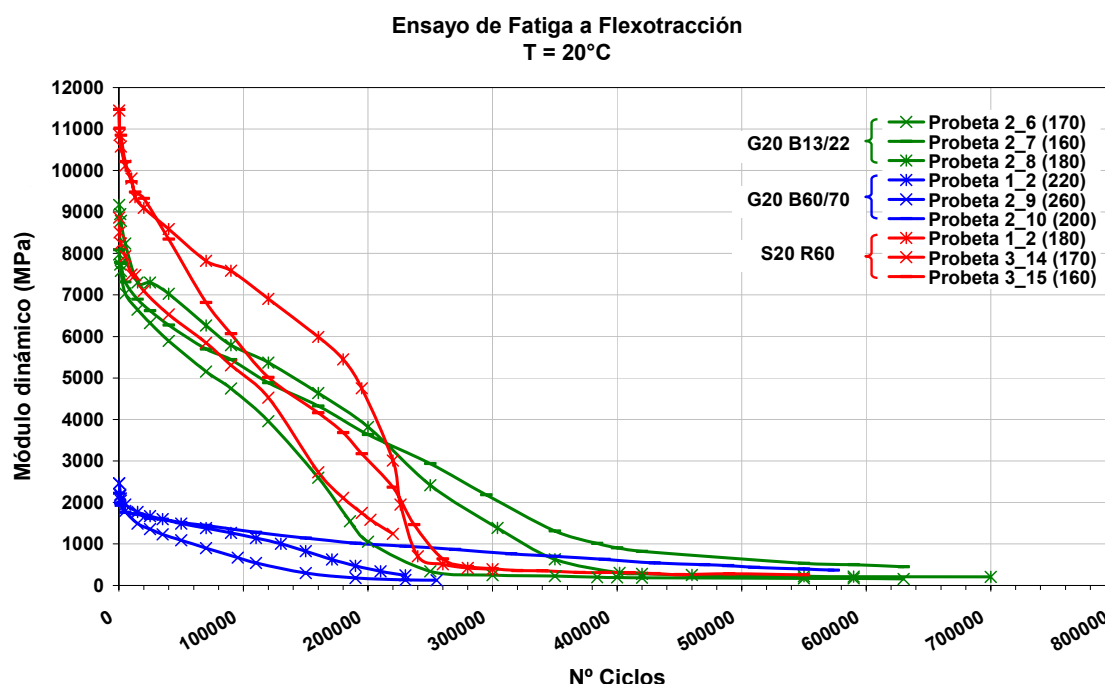


Fig. 5 - 2 Curvas de módulo dinámico versus número de ciclos, ensayo a fatiga a flexotracción, 20 °C

En la Fig. 5 - 3 se representa la evolución de la deformación unitaria con respecto a los ciclos de carga para el ensayo a fatiga realizado a la temperatura de 5°C. Ambas mezclas, la más rígida fabricada con el betón B13/22 y la más flexible fabricada con el betón B60/70, presentan una baja deformación inicial, siendo mayor la de la mezcla fabricada con el ligante de mayor penetración. A su vez, el valor de deformación crítica para ambas mezclas se reduce respecto a sus símiles ensayadas a 20 °C, observándose así una pérdida, por parte del material, de su capacidad de admitir deformación.

En relación a la evolución del módulo dinámico representado en la Fig. 5 - 4, se puede observar, al igual que en el ensayo de fatiga realizado a 20°C, un rápido descenso a partir del ciclo en el que la probeta alcanza la deformación crítica, y que sus valores iniciales son mayores en la mezcla fabricada con el ligante de menor penetración, B13/22, lo que demuestra la alta fragilidad de este tipo de mezcla a bajas temperaturas, con respecto a la fabricada con el ligante de mayor penetración, B60/70.

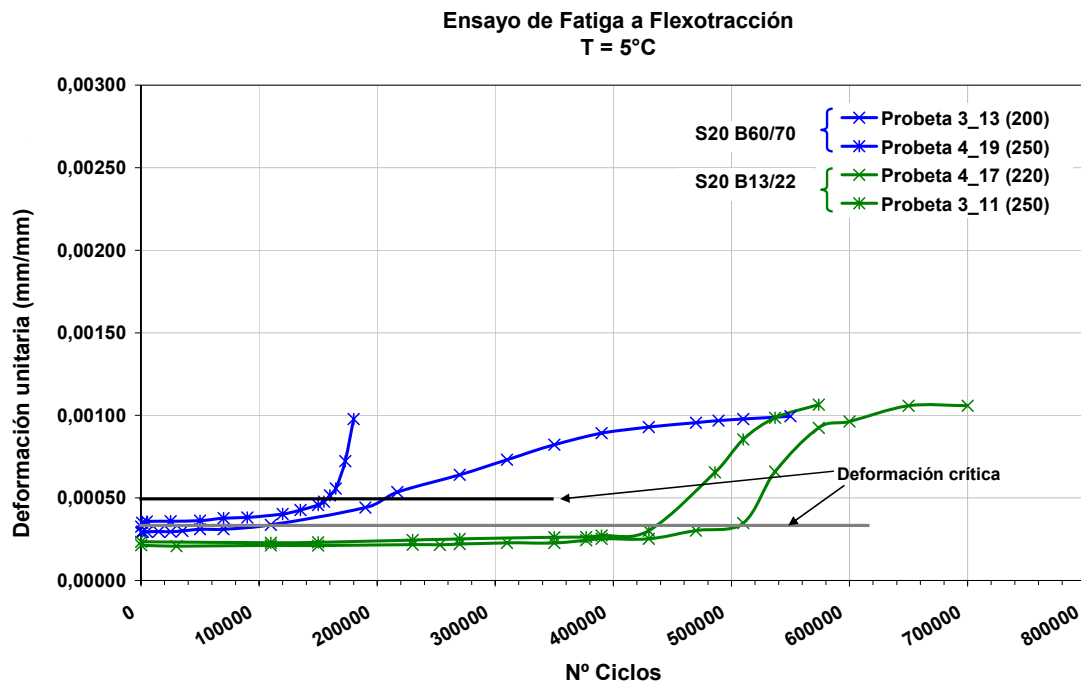


Fig. 5 - 3 Curvas de deformación unitaria versus número de ciclos, ensayo a fatiga a flexotracción, 5°C

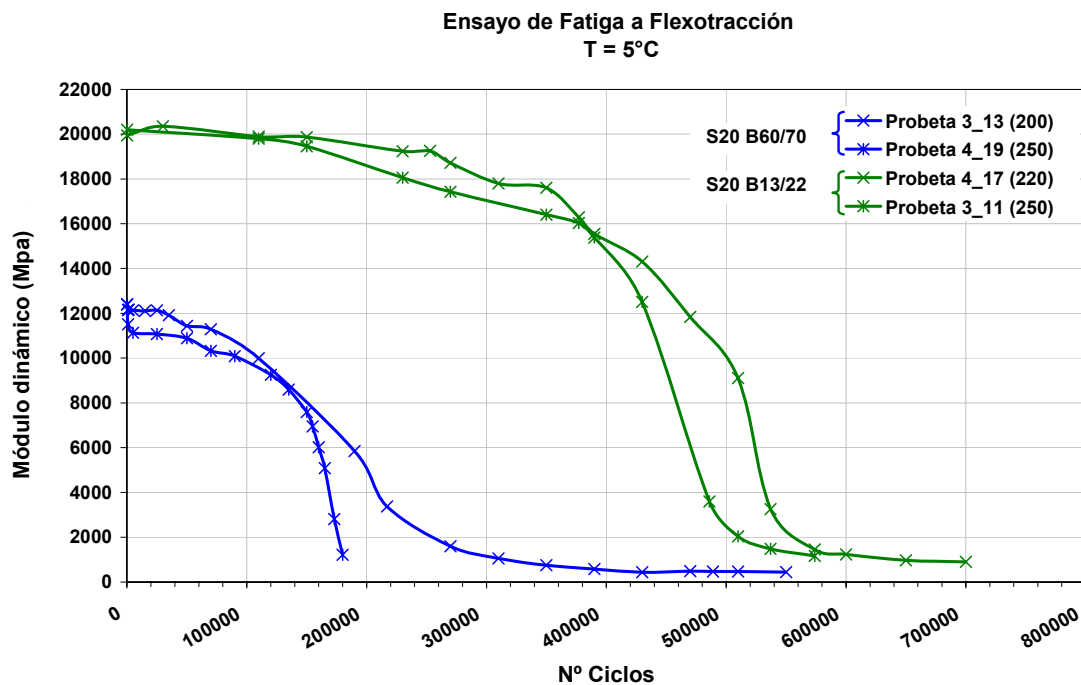


Fig. 5 - 4 Curvas de módulo dinámico versus número de ciclos, ensayo a fatiga a flexotracción, 5°C



5.2.2 Leyes de fatiga

Para determinar la ley de fatiga en el ensayo a flexotracción en tres puntos, se deben relacionar la deformación máxima inicial producida en el centro de la probeta con el número de ciclos necesario para reducir la rigidez o módulo a la mitad de su valor inicial. Con esto, se obtienen pares de valores correspondientes a diferentes amplitudes de desplazamiento aplicados a cada una de las probetas, permitiendo así, una vez trazada la línea de tendencia para los diferentes pares de valores, obtener la ley de fatiga con control de desplazamiento.

Los resultados obtenidos para las mezclas evaluadas en esta fase experimental se recogen en la Tabla 5 - 1 y se representan, según la tipología de mezcla, desde la Fig. 5 - 5 a la Fig. 5 - 7.

Tabla 5 - 1 Módulos dinámicos y leyes de fatiga de las mezclas evaluadas

Tipo de Mezcla	Temperatura	Módulo Dinámico	Ley de Fatiga $\varepsilon = a \cdot N^{-b}$	R ²
	(°C)	(MPa)		
G-20 B-60/70	20	2410	$\varepsilon = 0.0041 N^{-0.2124}$	0,95
S-20 B-60/70	20	3229	$\varepsilon = 0.0035 N^{-0.2061}$	0,85
G-20 B-13/22	20	8750	$\varepsilon = 0.0012 N^{-0.1731}$	0,77
S-20 B-13/22	20	11556	$\varepsilon = 0.0011 N^{-0.1638}$	0,78
G-20 B-60/70	5	9293	$\varepsilon = 0.0013 N^{-0.1684}$	0,62
S-20 B-60/70	5	13520	$\varepsilon = 0.0011 N^{-0.1662}$	0,68
G-20 B-13/22	5	18623	$\varepsilon = 0.0007 N^{-0.1383}$	0,54
S-20 B-13/22	5	23848	$\varepsilon = 0.0006 N^{-0.1277}$	0,87
S-20 R60	20	11212	$\varepsilon = 0.0008 N^{-0.1458}$	0,68
S-12 R40	20	9671	$\varepsilon = 0.0011 N^{-0.1751}$	0,96

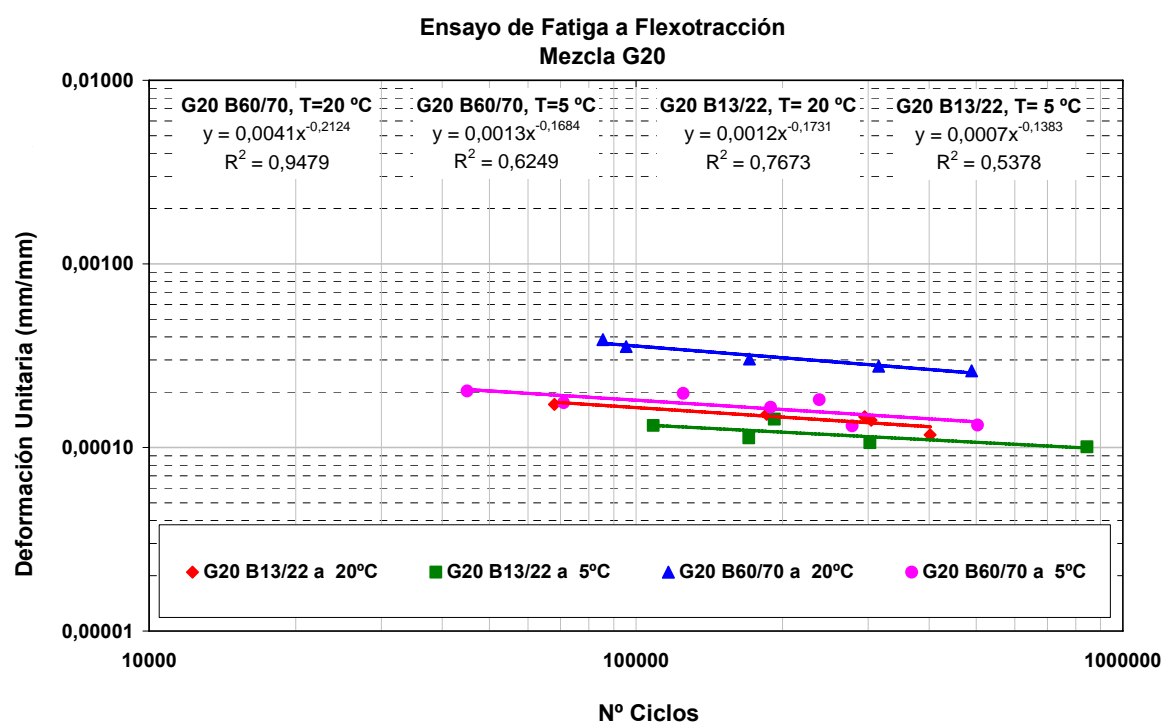


Fig. 5 - 5 Leyes de fatiga de mezcla G-20, betunes B13/22 y B60/70, a 5 y 20 °C

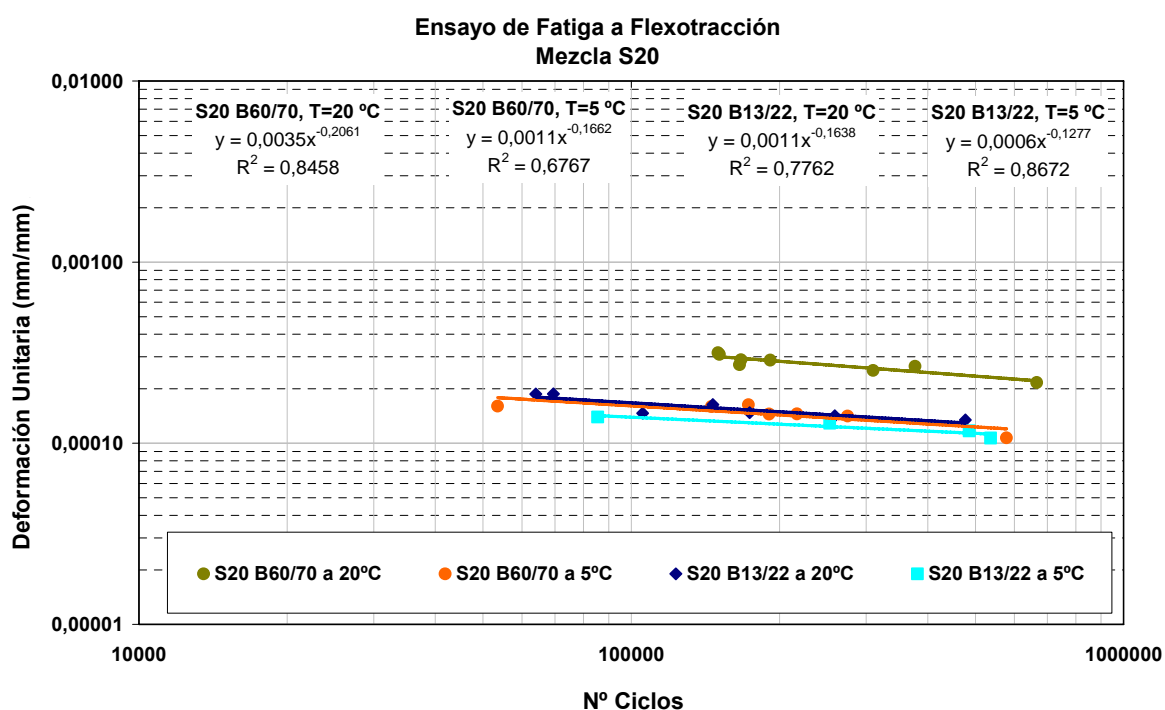
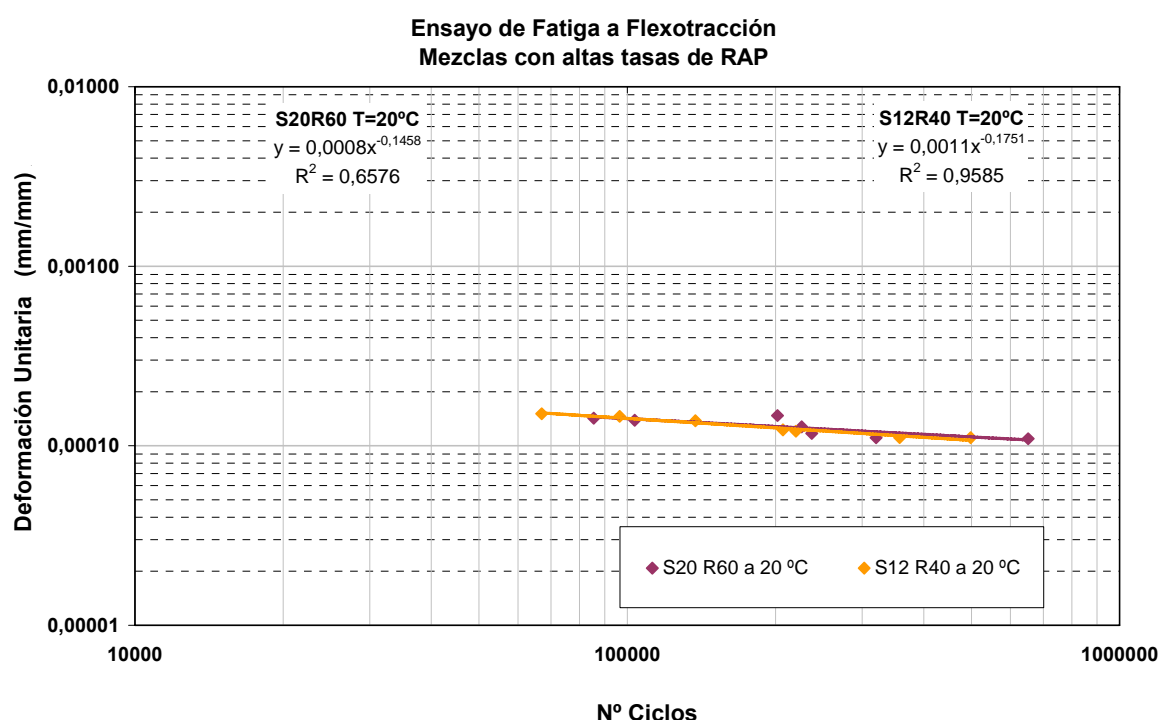


Fig. 5 - 6 Leyes de fatiga de mezcla S-20, betunes B13/22 y B60/70, a 5 y 20 °C



La influencia de la temperatura de ensayo, evaluada en las mezclas G-20 y S-20, muestra una respuesta muy similar en ambos tipos de mezcla, Fig. 5 - 5 y Fig. 5 - 6. Cuando éstas fueron fabricadas con el ligante de mayor penetración, B60/70, se observa una clara pérdida de capacidad de deformación, entre las temperaturas de 20 y 5 °C, puesto que para igual número de ciclos, es la mezcla ensayada a 20°C la que admite una mayor deformación. Sin embargo, las mezclas fabricadas con el ligante de menor penetración, B13/22, debido a su alta rigidez, presentan una menor diferencia entre los valores de deformación a igual número de ciclos, para las dos temperaturas evaluadas.

Adicionalmente, en la Tabla 5 - 1 se observa que aquellas mezclas que obtuvieron un mayor módulo dinámico, S-20 B13/22 y G-20 B13/22 a 5°C, fueron las que obtuvieron una menor pendiente de la ley de fatiga, parámetro “b” de la ley de fatiga. De manera opuesta, las mezclas que obtuvieron los menores valores de módulo dinámico, S-20 B60/70 y G-20 B60/70, fueron las que obtuvieron una mayor pendiente en la ley de fatiga.

Por otra parte, las mezclas fabricadas con el ligante de mayor penetración B60/70 y ensayadas a 20°C obtuvieron un mayor valor en el parámetro “a” de la ley de fatiga o deformación en el ciclo 1, que las mezclas fabricadas con el ligante más duro, B13/22, ensayadas a la misma temperatura, y también mayor que aquellas ensayadas a 5°C, que presentaron un comportamiento más frágil, con un bajo valor del parámetro “a” de la ley de fatiga.

Las mezclas fabricadas con un alto contenido de RAP, S-20 R60 y S-12 R40, ensayadas a 20°C, presentaron un comportamiento más bien frágil, bastante similar a las mezclas fabricadas con el ligante de menor penetración B13/22 ensayadas a la misma temperatura, obteniendo módulos dinámicos muy similares.

5.2.3 Resultados del ensayo Fénix

Los resultados obtenidos para las mismas mezclas ensayadas a fatiga en el punto anterior, pero esta vez ensayadas mediante el nuevo procedimiento Fénix, se pueden observar en la **Tabla 5 - 2** y desde la **Fig. 5 - 8** a la **Fig. 5 - 10**.

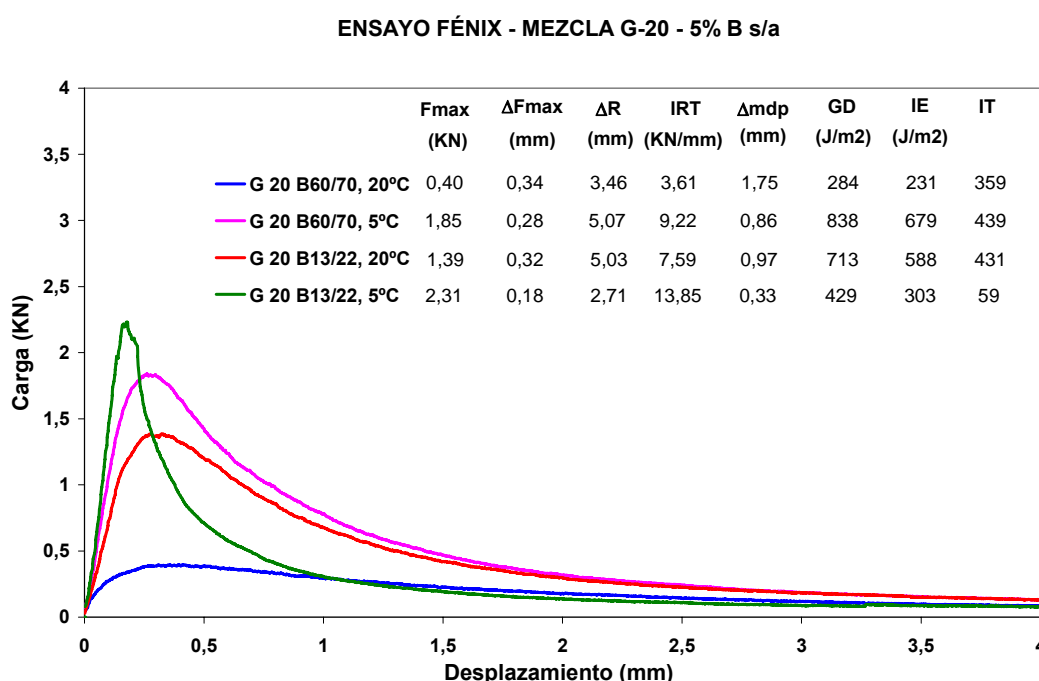


Fig. 5 - 8 Curvas carga – desplazamiento Mezcla G-20, 5% betún s/a

Al igual que en los ensayos de fatiga a flexotracción, la respuesta de las mezclas G-20 y S-20, frente a la variación de la temperatura fue muy similar. Ambos tipos de mezclas, cuando se fabricaron con el ligante de mayor penetración, B60/70, mostraron una pérdida de capacidad de deformación representada por el parámetro de desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , entre las dos temperaturas evaluadas. Lo mismo se observó en las mezclas confeccionadas con el ligante de menor penetración, B13/22, pero con una menor diferencia entre los desplazamientos, a las temperaturas evaluadas, **Fig. 5 - 8** y **Fig. 5 - 9**.

Por otra parte, aquellas mezclas que obtuvieron un módulo dinámico elevado en los ensayos de fatiga, presentaron altos valores de rigidez representados por el I_{RT} calculado mediante el



ensayo Fénix. Esto se puede observar en las mezclas ensayadas a la temperatura de 5°C y en aquellas ensayadas a 20 °C fabricadas con el ligante de menor penetración o con altas tasas de RAP (Fig. 5 - 8, Fig. 5 - 9 y Fig. 5 - 10).

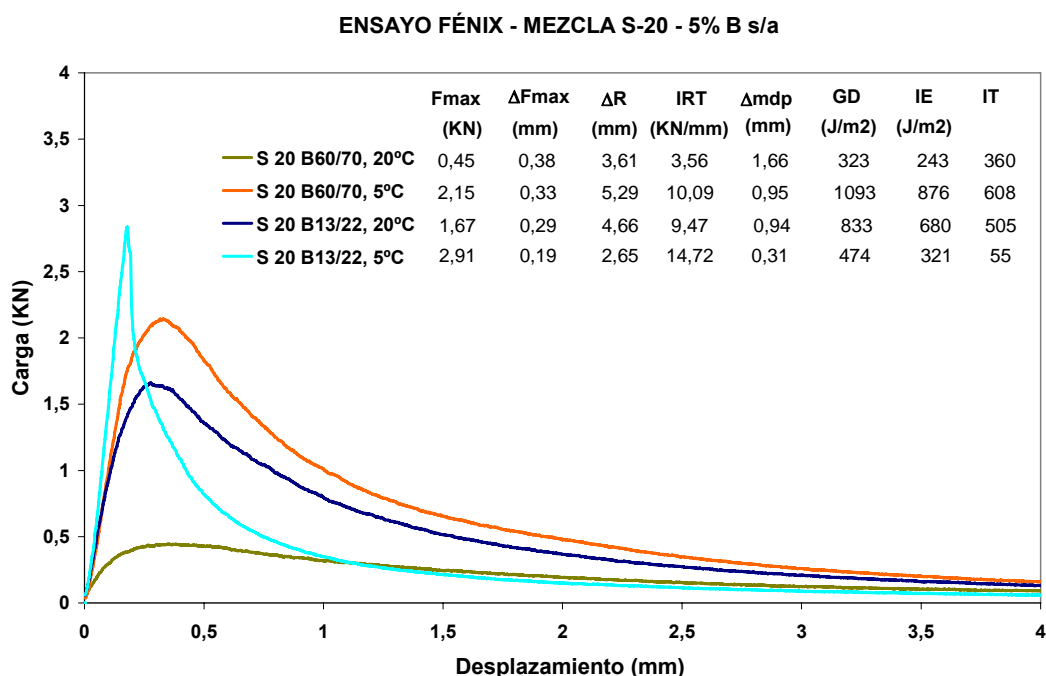


Fig. 5 - 9 Curvas carga – desplazamiento Mezcla S-20, 5% betún s/a

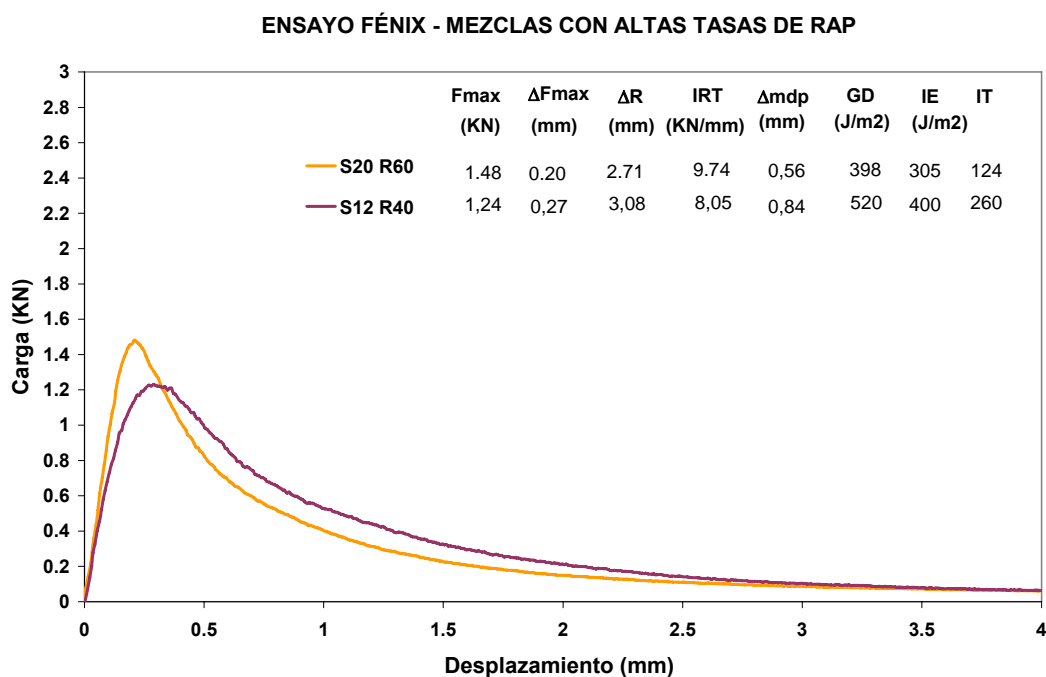


Fig. 5 - 10 Curvas carga – desplazamiento Mezclas con alto contenido de RAP



Tabla 5 - 2 Parámetros medios resultantes del ensayo Fénix para las mezclas evaluadas.

Tipo de Mezcla	Temperatura (°C)	Área de fractura Af (mm ²)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resistencia a Tracción RT (Mpa)	Desplazamiento a Fmax ΔFmax (mm)	Desplazamiento de Rotura ΔR (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT (KN/mm)	Desplazamiento 50% Fmax dp Δmdp (mm)	Energía Disipada GD (J/m ²)	Índice de Energía IE (J/m ²)	Índice de Tenacidad IT
G-20 B60/70	5	2782	1,85	0,68	0,28	5,07	9,22	0,86	838	679	439
	20	2798	0,40	0,15	0,34	3,46	3,61	1,75	284	231	359
G-20 B13/22	5	2810	2,31	0,84	0,18	2,71	13,85	0,33	429	303	59
	20	2812	1,39	0,50	0,32	5,03	7,59	0,97	713	588	431
S-20 B60/70	5	2733	2,15	0,80	0,33	5,29	10,09	0,95	1093	876	608
	20	2738	0,45	0,17	0,38	3,61	3,56	1,66	323	243	360
S-20 B13/22	5	2755	2,91	1,08	0,19	2,65	14,72	0,31	474	321	55
	20	2774	1,67	0,61	0,29	4,66	9,47	0,94	833	680	505
S-20 R60	20	2951	1,48	0,51	0,20	2,71	9,74	0,56	398	305	124
S-12 R40	20	2626	1,24	0,48	0,27	3,08	8,05	0,84	520	400	260



5.2.4 Predicción del comportamiento a fatiga de las mezclas por medio del ensayo Fénix

En este punto se desarrolla uno de los objetivos principales de esta investigación que establece la predicción del comportamiento a fatiga de las mezclas por medio de un procedimiento más sencillo, como es el nuevo procedimiento desarrollado en este estudio, el ensayo Fénix.

Para ello, se han establecido algunas relaciones entre los parámetros que definen el comportamiento a fatiga de las mezclas, entregados por el ensayo dinámico de fatiga a flexotracción en tres puntos, con algunos parámetros que definen el comportamiento a tracción directa, entregados por el ensayo Fénix. La relación obtenida entre ambos parámetros permitiría obtener una idea o predicción de la respuesta a fatiga de las mezclas. Así, se podría tener en cuenta esta propiedad en el momento de diseñar las mezclas, pero por medio de un procedimiento más sencillo y de menor tiempo de ejecución.

Los valores de los parámetros obtenidos por ambos procedimientos, que se van a relacionar, se observan en la **Tabla 5 - 3**. El grado de correlación entre los parámetros Fénix y los parámetros de las leyes de fatiga obtenido para cada una de las mezclas ensayadas, ha sido bastante satisfactorio, y se presentan en las **Fig. 5 - 11**, **Fig. 5 - 12** y **Fig. 5 - 13**.

Tabla 5 - 3 Parámetros correlacionados entre el ensayo Fénix y el ensayo de fatiga a flexotracción

Mezclas	Temperatura	Ensayo Fénix		Ensayo de Fatiga a Flexotracción en Tres Puntos			
		Índice de Rigidez a Tracción	Desplazamiento al 50% Fmax dp	Módulo dinámico	Ley de Fatiga $\varepsilon = a \cdot N^{-b}$	a	b
	(°C)	I _{RT} (KN/mm)	Δ_{mdp} (mm)	MD (MPa)			
G-20 B-60/70	20	3,61	1,75	2410	$\varepsilon = 0.0041 N^{-0.2124}$	0,0041	0,2124
	5	9,22	0,86	9293	$\varepsilon = 0.0013 N^{-0.1684}$	0,0013	0,1694
S-20 B-60/70	20	3,56	1,66	3229	$\varepsilon = 0.0035 N^{-0.2061}$	0,0035	0,2061
	5	10,09	0,95	13520	$\varepsilon = 0.0011 N^{-0.1662}$	0,0011	0,1662
G-20 B-13/22	20	7,59	0,97	8750	$\varepsilon = 0.0012 N^{-0.1731}$	0,0012	0,1731
	5	13,85	0,33	18623	$\varepsilon = 0.0007 N^{-0.1383}$	0,0007	0,1383
S-20 B-13/22	20	9,47	0,94	11556	$\varepsilon = 0.0011 N^{-0.1638}$	0,0011	0,1638
	5	14,72	0,31	23848	$\varepsilon = 0.0006 N^{-0.1277}$	0,0006	0,1277
S-20 R60	20	9,74	0,56	11212	$\varepsilon = 0.0008 N^{-0.1458}$	0,0008	0,1458
S-12 R40	20	8,05	0,84	9671	$\varepsilon = 0.0011 N^{-0.1751}$	0,0011	0,1751

La primera relación presentada en la Fig. 5 - 11 se establece entre los valores del índice de rigidez, I_{RT} , obtenidos del ensayo Fénix y los valores de módulo dinámico, MD, obtenidos del ensayo de fatiga a flexotracción. En este caso, las mezclas con menores rigideces (I_{RT}) o módulos dinámicos (MD), se sitúan en la parte inferior de la recta de tendencia. A su vez, las mezclas con mayores rigideces o módulos, como el caso de las confeccionadas con el ligante de menor penetración, B13/22, ensayadas a una temperatura de 5 °C, se sitúan en la parte superior de la tendencia.

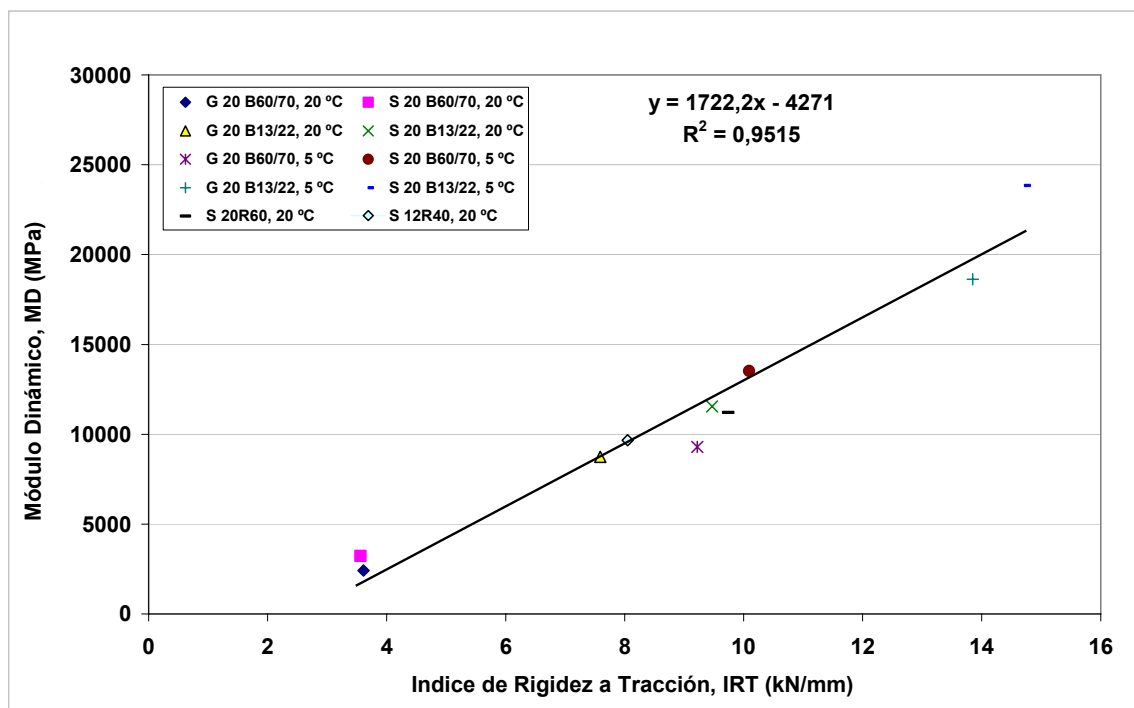


Fig. 5 - 11 Correlación entre Módulo Dinámico del ensayo de fatiga a flexotracción y el índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix

A continuación se estableció una correlación entre los parámetros de rigidez, I_{RT} , y desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , obtenidos del ensayo Fénix, y los parámetros de la ley de fatiga, pendiente y deformación en el ciclo 1 de la ley de fatiga, parámetros “b” y “a”, respectivamente.

En la Fig. 5 - 12 se observa que las mezclas con una mayor rigidez, I_{RT} , obtienen en el ensayo a fatiga una menor pendiente en la ley de fatiga y se sitúan en la parte inferior de la recta de tendencia. Por otra parte, las mezclas con rigideces bajas obtienen una mayor pendiente de la ley de fatiga situándose en la parte alta de la recta de tendencia, como es el caso de las mezclas fabricadas con el ligante de mayor penetración, B60/70, y ensayadas a la temperatura de 20 °C.

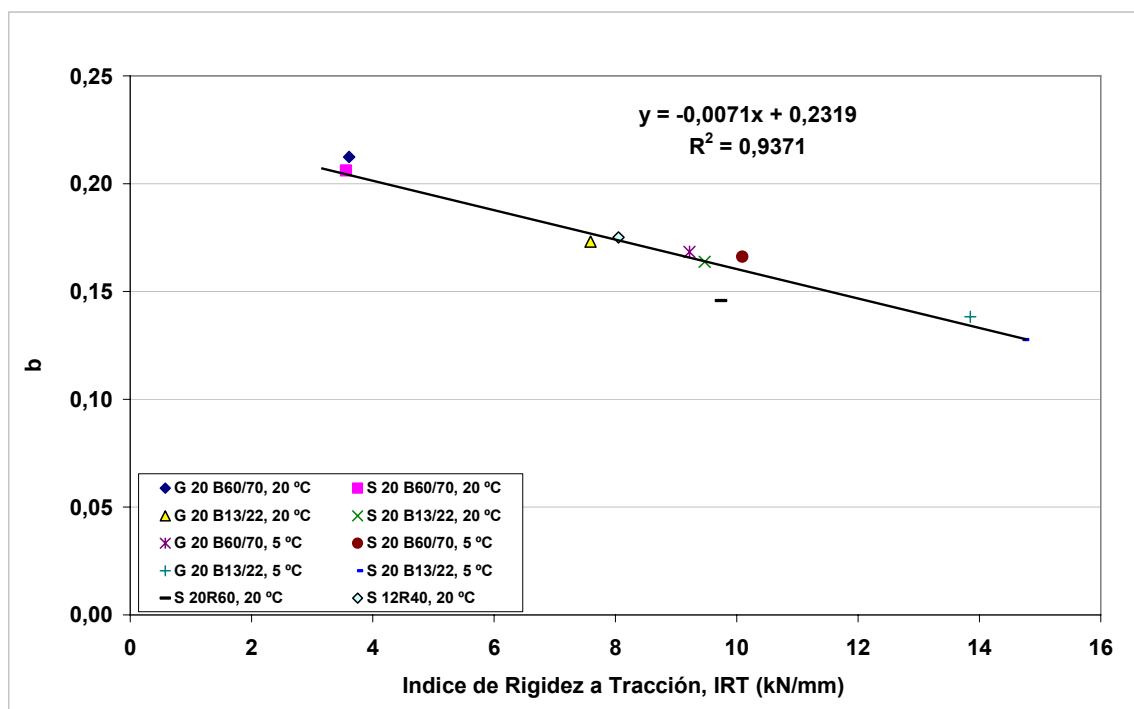


Fig. 5 - 12 Correlación entre parámetro “b” de la ley de fatiga a flexotracción y el índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix

En la Fig. 5 - 13 se observa como las mezclas que obtienen un mayor desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico en el ensayo Fénix, Δ_{mdp} , presentan una mayor deformación en el ciclo 1 en el ensayo a fatiga, como es el caso de las mezclas confeccionadas con los ligantes de mayor penetración ensayadas a la temperatura de 20 °C. A su vez, las mezclas fabricadas con ligantes de menor penetración y ensayadas a bajas temperaturas se sitúan en la parte inferior de la línea de tendencia.

Mediante las correlaciones encontradas entre ambos procedimientos se demuestra que es posible estimar o predecir la repuesta a fatiga de las mezclas por medio de un procedimiento más sencillo. Una nueva ley de fatiga se podría estimar mediante los parámetros de entrada: índice de rigidez a tracción, I_{RT} , y desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , entregados por el ensayo Fénix.

A su vez, la buena correlación entre el módulo dinámico obtenido del ensayo de fatiga, MD, y el índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix, I_{RT} , nos permite conocer el valor del módulo de una mezcla, que junto a la ley de fatiga, permite determinar el comportamiento de la mezcla frente a la acción del tráfico en los actuales métodos analíticos de diseño de firmes.

Un esquema descriptivo de las correlaciones determinadas en este capítulo que permiten estimar el comportamiento a fatiga de las mezclas, se observa en la Fig. 5 - 14.

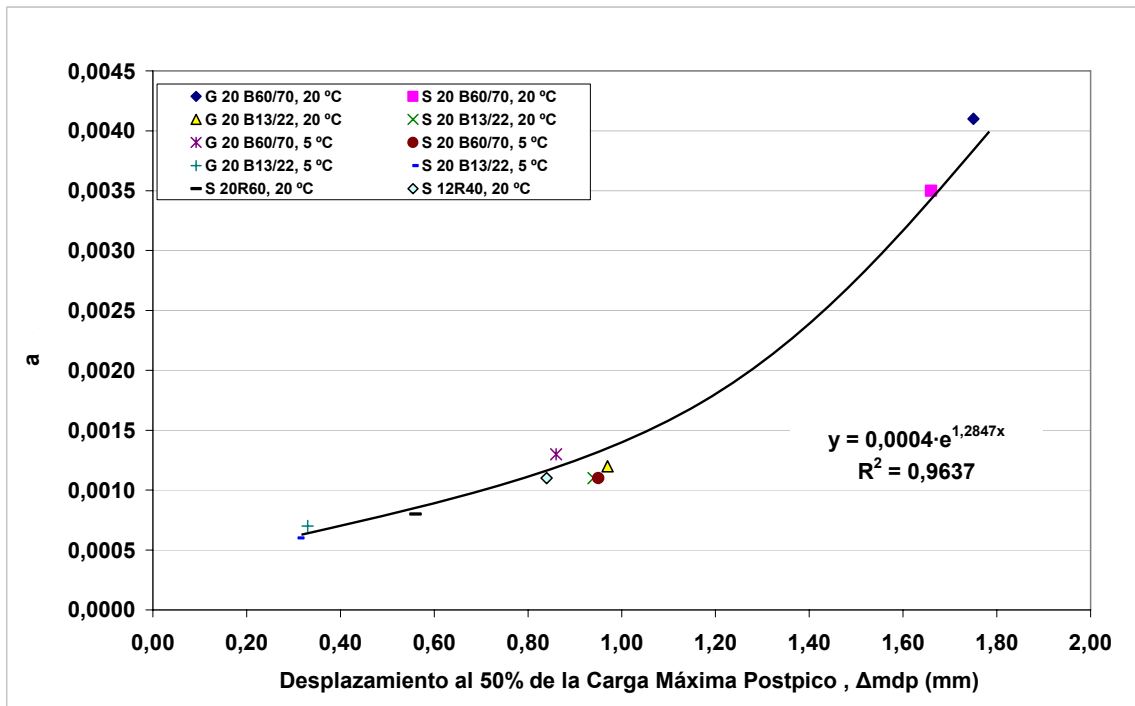


Fig. 5 - 13 Correlación entre parámetro “a” de la ley de fatiga a flexotracción y el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico del ensayo Fénix

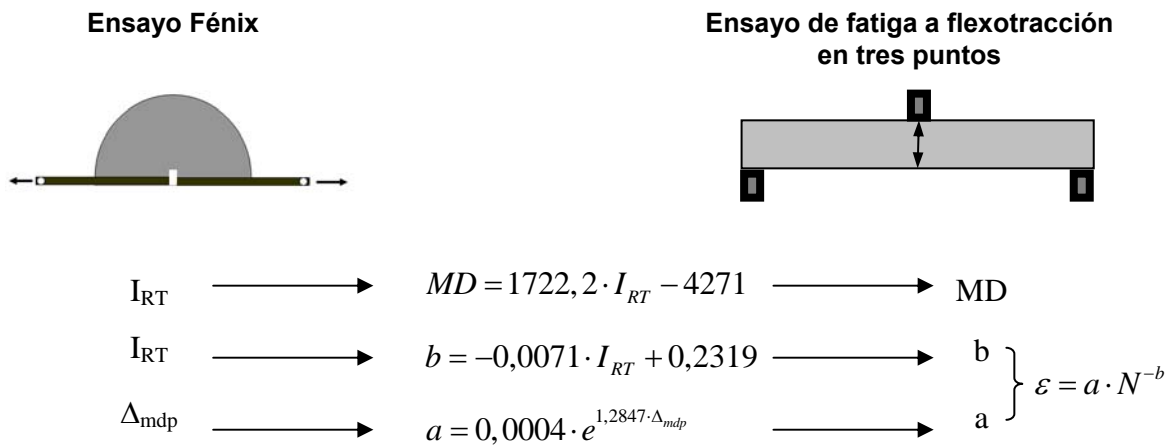


Fig. 5 - 14 Correlaciones de los parámetros Fénix con los de la ley de fatiga a flexotracción



CAPÍTULO 6

Aplicación del Ensayo Fénix al Diseño de Mezclas Resistentes a Fatiga



6.1 INTRODUCCIÓN

La resistencia a fisuración de una mezcla bituminosa está relacionada con su energía de fractura o energía disipada en el proceso de fisuración. Cuanto mayor sea el valor de esta propiedad, más esfuerzo será necesario realizar para conseguir la fisuración de la mezcla en el firme. Ahora bien, esta rotura puede ser frágil, es decir, con muy poca deformación, o bien dúctil y tenaz, en la que la carga se mantiene durante el proceso de rotura y va descendiendo lentamente. En este último caso, la pérdida total de la carga se produce a una deformación muy alta comparada con la de inicio de la fractura del material, registrada en la carga máxima, en un ensayo a tracción directa.

Como se ha visto en el capítulo anterior, las mezclas bituminosas con comportamiento frágil se caracterizan por tener una ley de fatiga muy poco inclinada, casi horizontal, siendo el valor del coeficiente “b” de su ley de fatiga muy pequeño. Para estos materiales frágiles existe un rango de deformaciones muy reducido en que el material falla por fatiga; por debajo de este rango el material no falla y por encima se fractura rápidamente. Además, en estos materiales se produce un rápido progreso de la fisura sin que apenas se deformen.

Por otra parte, las mezclas con una respuesta más dúctil y tenaz, suelen tener un módulo más bajo y su fallo por fatiga tiene lugar en un rango mayor de deformaciones. Estas mezclas presentan una ley de fatiga más inclinada, con un mayor valor del coeficiente “b” y una mayor deformación inicial, es decir, un mayor valor del parámetro “a” de la ley de fatiga. A su vez, estas mezclas más dúctiles y tenaces rompen con una mayor deformación y necesitan que el firme se deforme más para propagar la fisura, cosa que a veces no ocurre por impedirlo la rigidez de las capas inferiores del firme, factor que no es tenido en cuenta en el cálculo de la vida a fatiga de las capas de mezcla bituminosa en los métodos de dimensionamiento analíticos.

Mediante el ensayo Fénix se puede determinar la energía disipada en el proceso de fisuración y, tal como se ha descrito en el estado del conocimiento de esta Tesis Doctoral, en numerosas investigaciones se ha establecido este parámetro como un indicador valioso para caracterizar las mezclas en relación a su resistencia a la fisuración. Al igual que en los ensayos de fatiga, parámetros de rigidez y deformación también son obtenidos por medio del nuevo ensayo Fénix, lo que permite, en base a estos parámetros, poder clasificar a las mezclas bituminosas respecto a su respuesta a fatiga.

De acuerdo a lo señalado, si se buscan mezclas resistentes a la fisuración por fatiga y que sean más tenaces, deberán tener una energía de rotura alta y una elevada capacidad de deformación. Es decir, un valor alto de energía disipada en la zona de rotura postpico en el ensayo Fénix con



un elevado desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , o que es lo mismo, un alto índice de tenacidad, I_T .

Es por ello, que en este capítulo se analiza la relación de los parámetros de energía disipada, tenacidad, capacidad de deformación y rigidez, entregados por el ensayo Fénix, y se presentan a su vez, nuevos instrumentos que se pueden ser aplicados en el diseño de mezclas resistentes a fatiga.

6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.2.1 Análisis del efecto de contenido de ligante en mezclas rígidas y dúctiles.

Con objeto de estudiar la respuesta de una mezcla rígida respecto a una más dúctil, se ha partido de dos betunes de diferente penetración y se ha evaluado el efecto del contenido de ligante y la temperatura de ensayo. La mezcla más rígida fue fabricada con un betún duro, B13/22, y la mezcla más dúctil se fabricó con un ligante de mayor penetración, B60/70. Las temperaturas de ensayo correspondieron a -10, 5 y 20 °C y se registraron los resultados de los tres contenidos de betún evaluados (3.5, 4.5 y 5.5% s.a.).

Se ha analizado la variación de los parámetros del ensayo Fénix: índice de tenacidad, I_T , deformación al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , y energía disipada en el proceso de fractura, G_D , en función del índice de rigidez, I_{RT} .

En la Fig. 6 - 1 puede observarse que todas aquellas mezclas que en principio pudieran tener un comportamiento frágil a fatiga, caso de la mezcla con betún B13/22 ensayada a -10 y 5 °C y la mezcla con betún B60/70 ensayada a -10 °C, presentan unos valores del índice de tenacidad muy bajos, por debajo de 50 en casi la totalidad de los casos. Sin embargo, las mezclas con betún B60/70 a 5 y 20 °C y la mezcla con betún B13/22 a 20 °C presentan unos mayores índices de tenacidad, por encima de 200. Se observa además, que el índice de tenacidad, va aumentando conforme aumenta el índice de rigidez a tracción, hasta alcanzar un valor máximo y luego comienza a descender, cuando la mezcla se va haciendo frágil. Además, en la Fig. 6 - 1 se aprecia la tendencia que a medida que aumenta el contenido de ligante en la mezcla se registran mayores valores de I_T y menores valores de rigidez, I_{RT} .

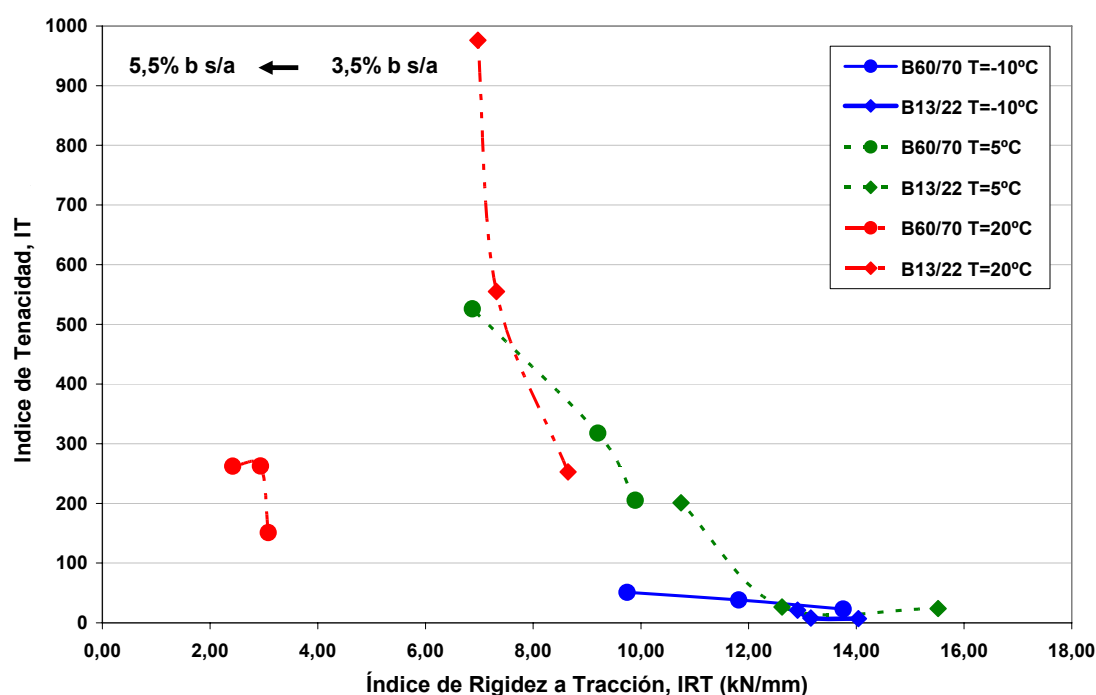


Fig. 6 - 1 Efecto del tipo y contenido de betún sobre la relación I_{RT} - I_T , Mezcla G-20 a diferentes temperaturas de ensayo

En la Fig. 6 - 2 se ha representado la variación del desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , con el índice de rigidez a tracción, I_{RT} . Se observa, al igual que en la figura anterior, un incremento de este parámetro conforme aumenta el contenido de betún para cada mezcla ensayada, registrando a su vez una pérdida de rigidez. También se aprecia que las mezclas más rígidas, las confeccionadas con betún B13/22 y ensayadas a -10 y 5°C, junto con las mezclas confeccionadas con betún B60/70 y ensayadas a -10 °C, presentan valores bajos de Δ_{mdp} , por debajo de 0.5 mm, con altos valores de rigidez, I_{RT} . Sin embargo, las mezclas más dúctiles, las fabricadas con betún B60/70 y ensayadas 5 y 20 °C y la fabricada con betún B13/22 y ensayada a 20 °C, presentan mayores valores de Δ_{mdp} , lo que se entiende como un aumento de la capacidad de admitir deformación por parte de la mezcla.

En la Fig. 6 - 3 se ha representado la relación entre la energía disipada en el proceso de fractura, G_D , y el índice de rigidez a tracción, I_{RT} . Los resultados son muy similares a los comentados en la Fig. 6 - 1 con el índice de tenacidad. En ella puede observarse el efecto significativo que tiene el aumento del contenido de betún para aumentar la energía disipada en el proceso de fractura de la mezcla y disminuir su rigidez. El efecto del contenido de betún para mejorar la resistencia a fatiga de las mezclas es especialmente notable en el caso de la mezcla con el betún B13/22 ensayada a 20 °C, puesto que el valor de su energía disipada aumenta considerablemente sin apenas disminuir el módulo.

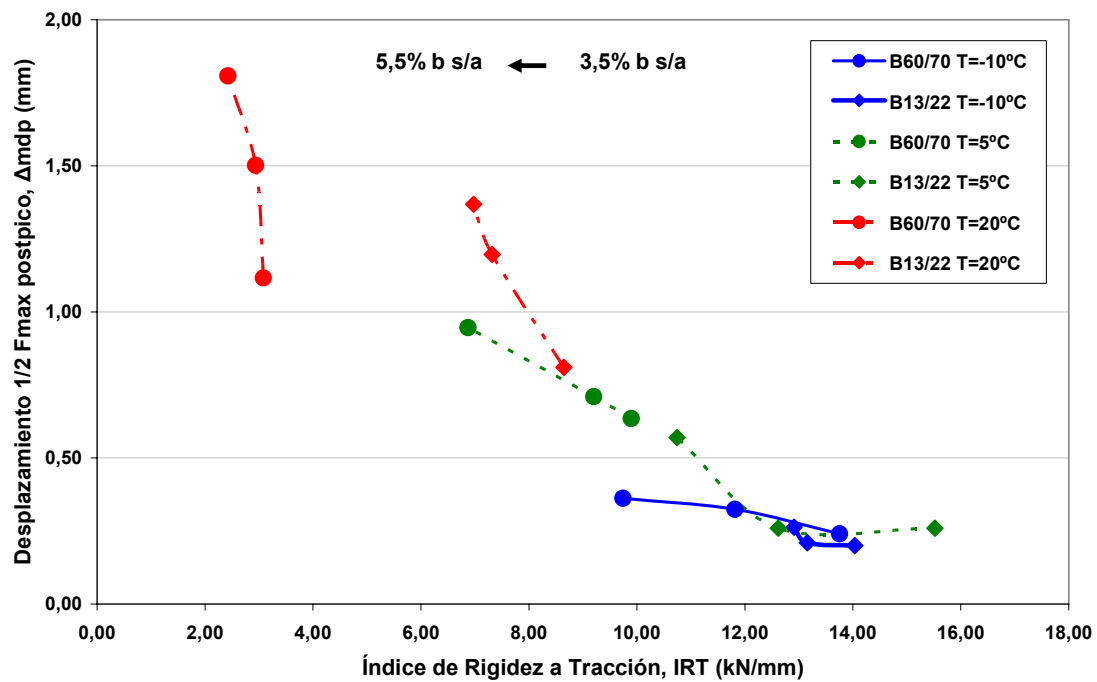


Fig. 6 - 2 Efecto del tipo y contenido de betún sobre la relación $I_{RT}-\Delta_{mdp}$, Mezcla G-20 a diferentes temperaturas de ensayo

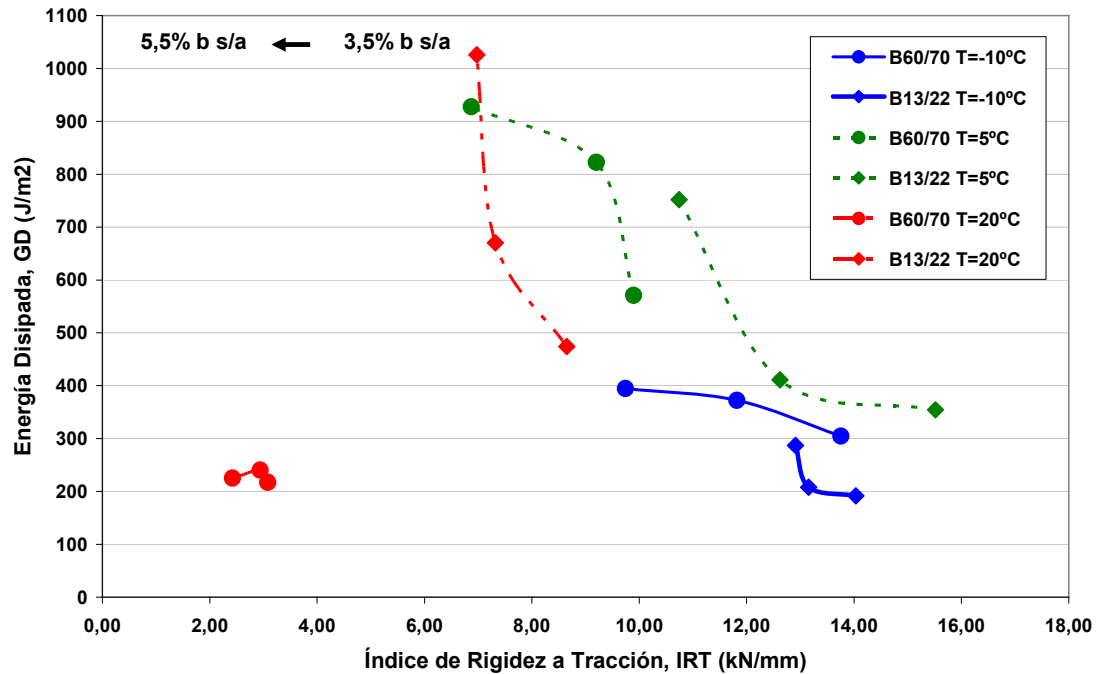


Fig. 6 - 3 Efecto del tipo y contenido de betún sobre la relación $I_{RT}-G_D$, Mezcla G-20 a diferentes temperaturas de ensayo

6.2.2 Análisis del comportamiento a fatiga mezclas rígidas y dúctiles.

Los resultados expuestos en este segundo apartado corresponden a los parámetros del ensayo Fénix: desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , energía disipada, G_D , e índice de tenacidad, I_T , y su relación con la rigidez (I_{RT}). Se han analizado las mismas mezclas evaluadas en el capítulo 5, frecuentemente utilizadas en capas de base e intermedias en firmes bituminosos: las de tipo S-20 y G-20 fabricadas con dos betunes de distinta penetración, B60/70 y B13/22, con el mismo contenido de ligante y evaluadas a las temperaturas de 5 y 20 °C, y las mezclas S-12 y S-20, fabricadas con altas tasas de material reciclado y evaluadas a la temperatura de 20 °C.

En la Fig. 6 - 4, se ha representado la relación entre el índice de rigidez a tracción de las mezclas y su desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, obtenido del ensayo Fénix.

En dicha figura se han establecido tres zonas de acuerdo con la respuesta de la mezcla frente a las variables de temperatura y rigidez. En la zona 1, se sitúan las mezclas con una baja rigidez, consecuencia de la mayor penetración del betún empleado y la temperatura de ensayo de 20°C, mostrando los valores más altos de desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} . En la zona 2, se observan las mezclas con un módulo de rigidez intermedio, en la que se sitúan las mezclas fabricadas con el betún más blando y ensayadas a una temperatura más baja, de 5°C, las fabricadas con el betún más duro, B13/22, y ensayadas a la temperatura de 20 °C y aquellas con altas tasas de material reciclado ensayadas a 20 °C. Finalmente, en la zona 3, se sitúan las mezclas cuya rigidez es muy alta, que fueron las fabricadas con el betún duro y que además fueron ensayadas a la temperatura de 5 °C, las cuales presentan los valores más bajos de desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , producto de su fragilidad.

Ahora bien, de acuerdo al tipo de mezcla a seleccionar para una estructura de firme, tendrá mejor comportamiento a fatiga aquella mezcla que para similar valor de rigidez, I_{RT} , y a igualdad de condiciones ambientales o térmicas, obtenga un mayor valor del desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} . Esto queda reflejado en la zona 2 de la Fig. 6 - 4, puesto que para los pares de mezclas con similares valores de rigidez, G-20 B13/22 - S-12 R40 y S-20 B13/22 – S-20 R60, ensayadas todas a una misma temperatura de 20 °C, se obtienen mayores valores del desplazamiento al 50% de la carga máxima, Δ_{mdp} , en aquellas que no contienen material reciclado en su composición, lo que es lo mismo que decir que obtienen un mayor valor del coeficiente “a” en la ley de fatiga. Por otra parte, estas mezclas, al tener un valor similar de rigidez, I_{RT} , obtendrían también un valor similar del parámetro “b” o pendiente de la ley de fatiga, con módulos dinámicos similares. Lo anterior se traduce en que las mezclas sin material reciclado, con similares rigideces que las recicladas y evaluadas en las mismas condiciones de

temperatura, pueden admitir una mayor deformación para similares solicitaciones de carga, admitiendo por tanto un mayor número de ciclos a fatiga.

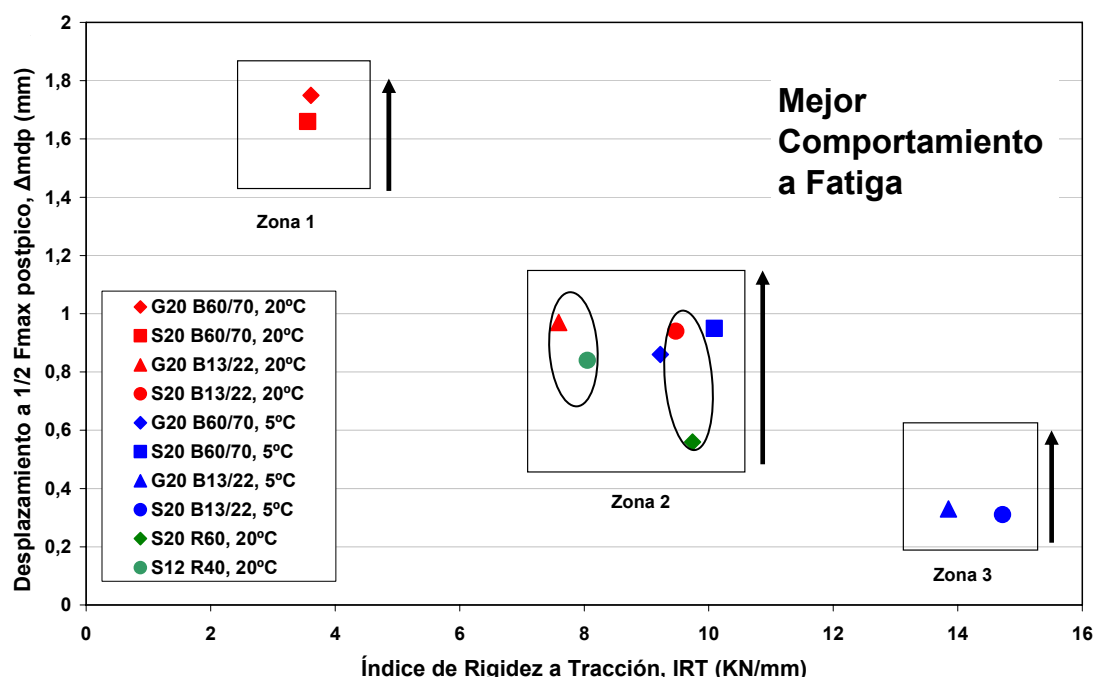


Fig. 6 - 4 Índice de rigidez a tracción versus Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico

En las Fig. 6 - 5 y Fig. 6 - 6 se ha graficado la relación entre el índice de rigidez a tracción de las mezclas evaluadas y la energía disipada y el índice de tenacidad obtenidos del ensayo Fénix, respectivamente.

Al igual que en el análisis anterior en ambas figuras se han establecido tres zonas. La zona 1 compuesta por aquellas mezclas con una respuesta más dúctil, que presentan bajos valores de rigidez y energía disipada en el proceso de fisuración, y con valores intermedios de tenacidad. Una zona 2 donde se sitúan las mezclas con valores de rigidez intermedios y mayores valores de energía disipada y tenacidad. Y finalmente una zona 3 donde se sitúan las mezclas con una respuesta más frágil, con altos valores de rigidez, pero con valores muy bajos de energía disipada y tenacidad, debido principalmente a la baja capacidad de deformación que presentan este tipo de mezclas.

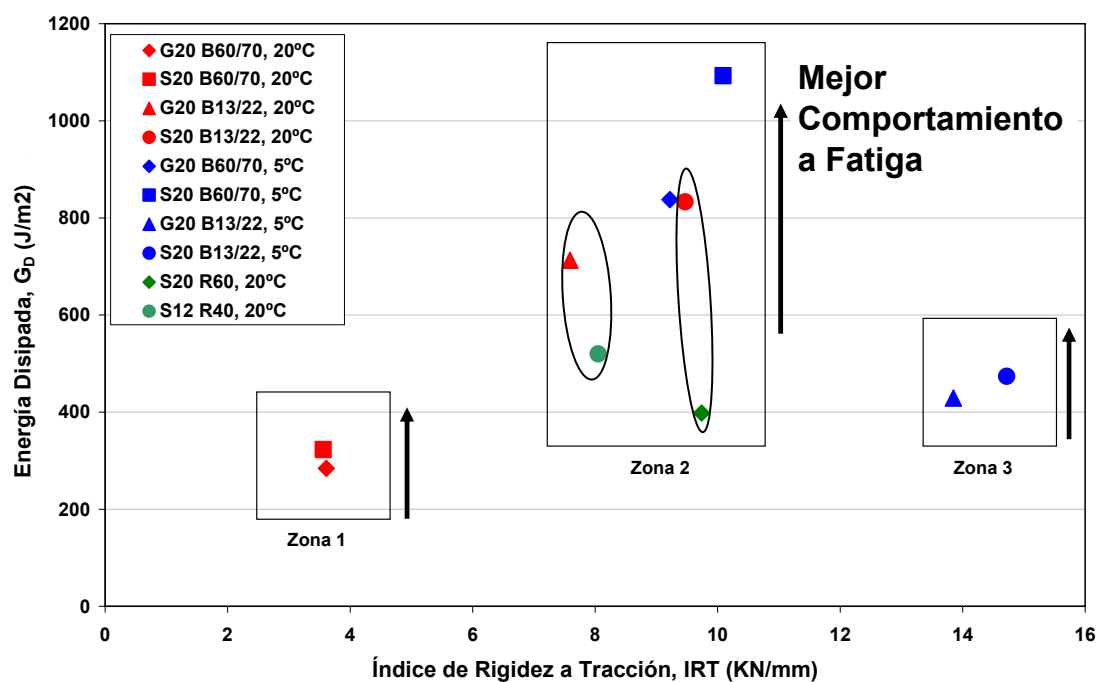


Fig. 6 - 5 Índice de rigidez a tracción versus Energía disipada en el proceso de fisuración

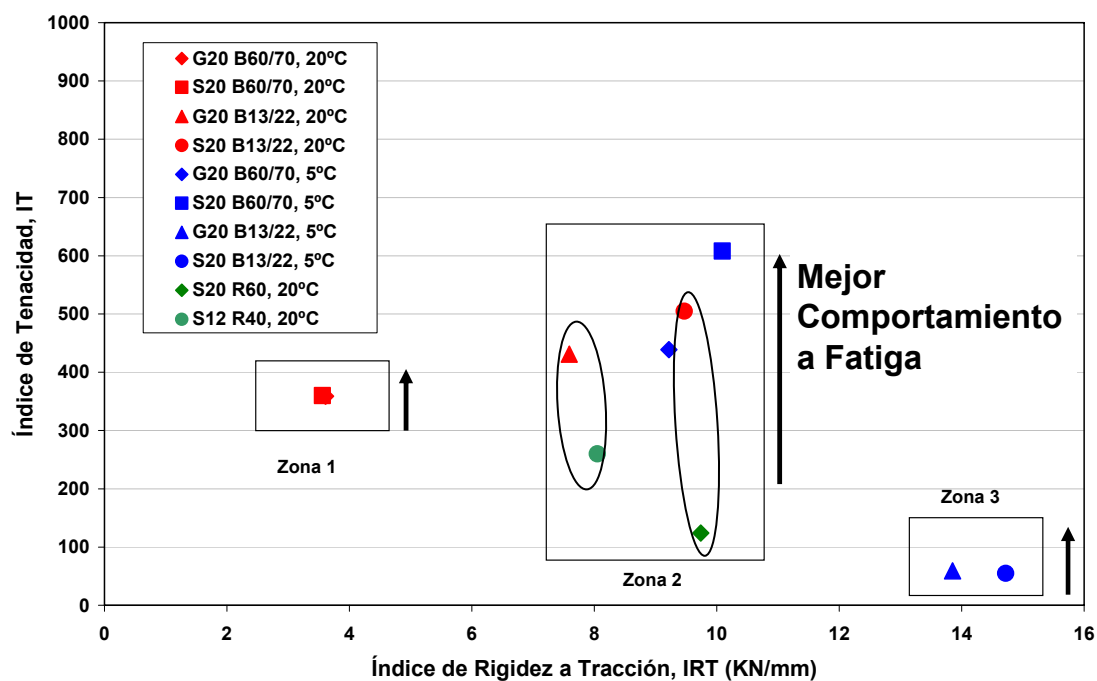


Fig. 6 - 6 Índice de rigidez a tracción versus Índice de tenacidad



De forma similar al análisis del desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico de la Fig. 6 - 4, la mezcla que tendrá una mejor respuesta a fatiga será aquella que para similares valores de rigidez, I_{RT} , obtenga un mayor valor de energía disipada y tenacidad, en igualdad de condiciones ambientales o térmicas.

Esto queda de manifiesto al comparar los pares de mezclas con similares rigideces ensayadas en igualdad de condiciones térmicas ubicadas en la zona 2, G-20 B13/22 – S-12 R40 y S-20 B13/22 – S-20 R60. Se observa en las Fig. 6 - 5 y Fig. 6 - 6, que las mezclas que poseen una mejor respuesta a fatiga son aquellas que no utilizan material reciclado y que registran mayores valores tanto de energía disipada, G_D , como de tenacidad, I_T .

6.3 APLICACIÓN DEL ENSAYO FÉNIX AL DISEÑO DE MEZCLAS RESISTENTES A FATIGA

El diseño de mezclas bituminosas debe considerar varias propiedades mecánicas a cumplir en función de los distintos tipos de variables a las que las mezclas están expuestas, tales como: el clima imperante en la zona de servicio, la estructura de firme considerada, las cargas del tráfico y los gradientes térmicos existentes, entre muchos otros factores. De modo muy general, el diseño de una mezcla bituminosa consiste en seleccionar el tipo de áridos y granulometría a utilizar, además del tipo y contenido de ligante, con el objetivo de que se cumplan todos los requerimientos específicos y propiedades mecánicas pretendidas en la mezcla diseñada, que se utilizará dentro de la estructura del firme proyectado, para determinadas condiciones ambientales y de tráfico.

Ahora bien, resulta que para cualquier tipología de mezcla que se desee diseñar, ya sea una mezcla flexible, o bien, una mezcla más rígida con un alto valor del módulo de rigidez, se debe procurar que su comportamiento a fatiga sea el mejor posible. Por lo tanto, es conveniente evaluar esta propiedad, de forma habitual, en el diseño de las mezclas.

Basándonos en el análisis de los resultados obtenidos en este capítulo, en el diseño de una mezcla bituminosa se debe pretender, en iguales condiciones de rigidez y evaluada en similares condiciones ambientales, que ésta tenga una elevada capacidad de deformación y, a su vez, que sea capaz de disipar la mayor cantidad de energía durante todo su proceso de fisuración y rotura. Por tanto, para obtener una mayor resistencia a la fisuración por fatiga se debe procurar que las mezclas a diseñar, para una rigidez y condición ambiental deseada, tenga los valores más altos posibles de desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} , energía disipada, G_D e índice de tenacidad, I_T , obtenidos por el ensayo Fénix.



Señalado lo anterior, se proponen a continuación algunos instrumentos de apoyo al diseño de mezclas, que permiten evaluar la respuesta a fatiga de éstas a partir de un procedimiento sencillo y eficaz, como es el ensayo Fénix. Para ello, en las figuras Fig. 6 - 7, Fig. 6 - 8 y Fig. 6 - 9 se han representado los parámetros medios de desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, energía disipada e índice de tenacidad, resultantes de todas las mezclas evaluadas en este trabajo de investigación.

Los instrumentos de apoyo al diseño de mezclas aquí propuestos y presentados en las figuras señaladas, se basan en establecer, a modo comparativo, en qué zona se encuentran nuestras posibles alternativas de mezclas a utilizar en un firme, en función de las condiciones ambientales y la estructura del firme a proyectar, a partir de los parámetros obtenidos del ensayo Fénix.

Por ejemplo, para firmes de espesores medios o pequeños ubicados en zonas de con altos gradientes térmicos se requerirán mezclas más flexibles, que registran valores bajos rigidez, pero una alta capacidad de deformación. Y entre las mezclas que cumplan estas condiciones, a similitud de rigidez (I_{RT}), tendrá una mejor respuesta a fatiga, aquella que tenga una mayor capacidad de deformación (mayor valor de Δ_{mdp} , Fig. 6 - 7) y que sea capaz de disipar una mayor cantidad de energía, ya sea en todo el proceso de fisuración (mayor valor de GD, Fig. 6 - 8), o en la zona de rotura o softening con una mayor capacidad de deformación (mayor valor de I_T , Fig. 6 - 9).

Para el caso de firmes con espesores mayores ubicados en climas con bajos gradientes térmicos se pueden emplear mezclas más rígidas, privilegiando el módulo de éstas dentro de sus propiedades mecánicas. Y al igual que en el caso anterior, entre las mezclas que posean una rigidez similar (I_{RT}), para iguales condiciones de temperatura, será más adecuada aquella mezcla que tenga mayor capacidad de deformación (mayor valor de Δ_{mdp} , Fig. 6 - 7) y tenga una mayor valor de energía disipada y tenacidad, Fig. 6 - 8 y Fig. 6 - 9.

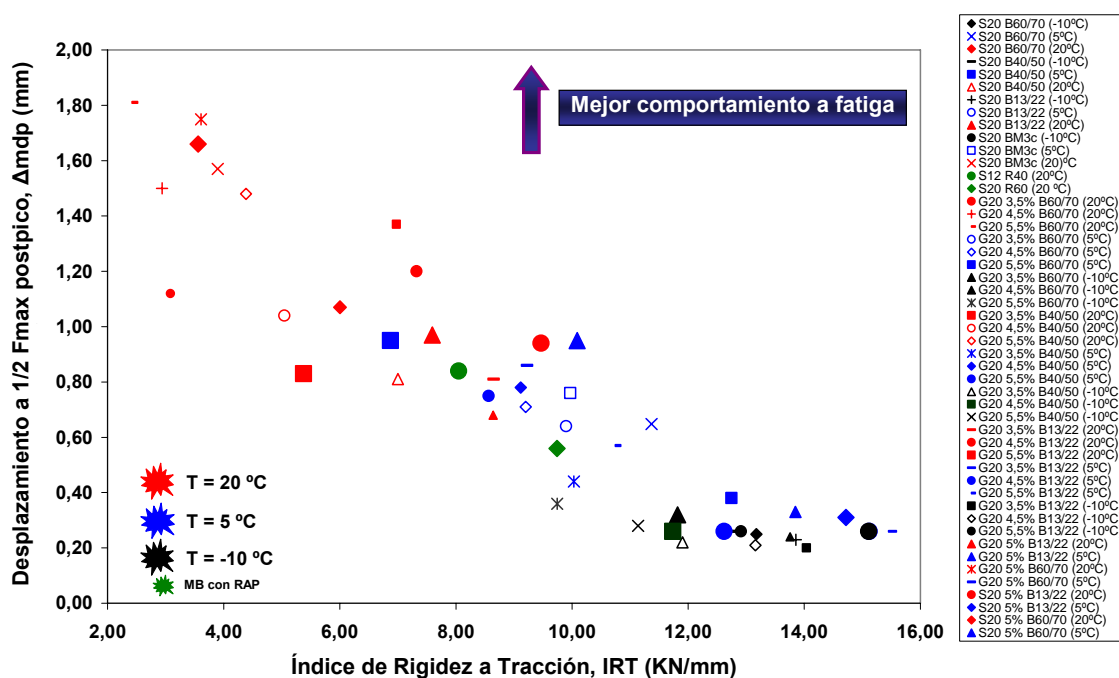


Fig. 6 - 7 Índice de rigidez a tracción vs. Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico
Valores medios del total de mezclas evaluadas por el procedimiento Fénix

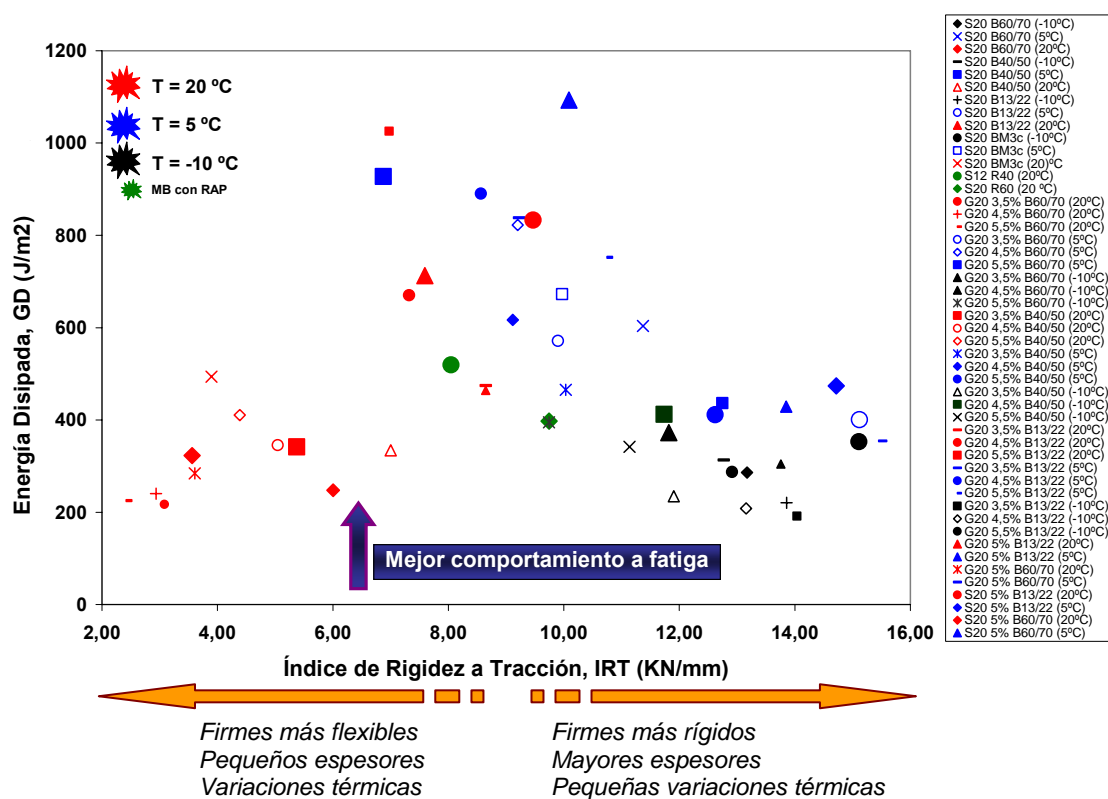


Fig. 6 - 8 Índice de rigidez a tracción vs. Energía disipada en el proceso de fisuración
Valores medios del total de mezclas evaluadas por el procedimiento Fénix

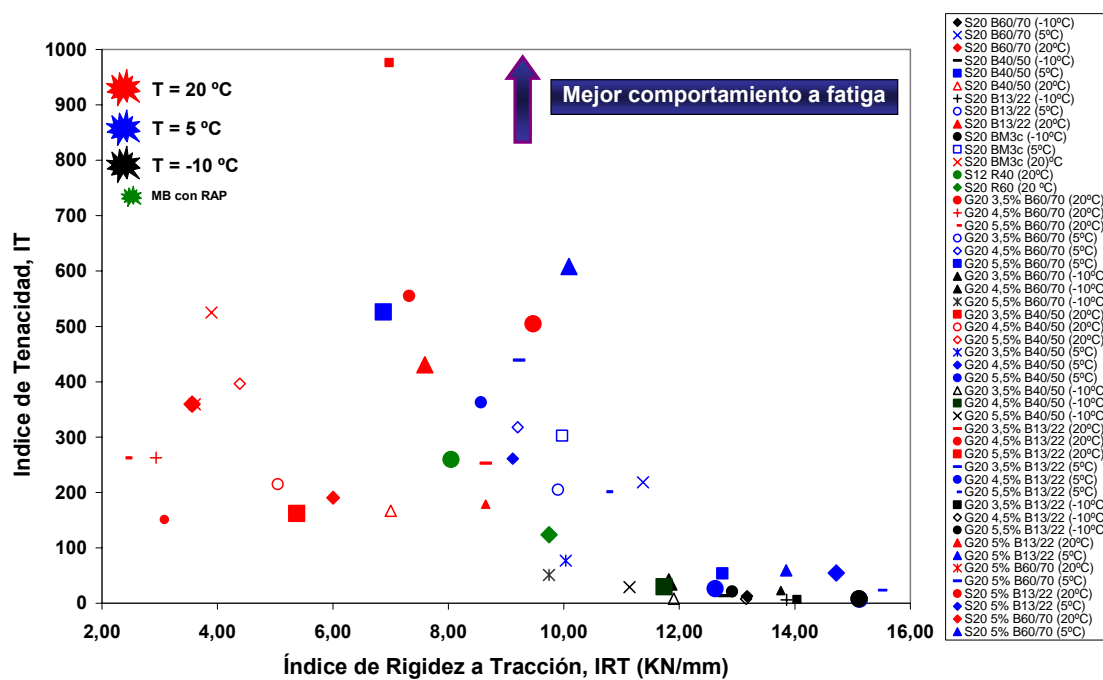


Fig. 6 - 9 Índice de rigidez a tracción vs. Índice de tenacidad
Valores medios del total de mezclas evaluadas por el procedimiento Fénix



CAPÍTULO 7

Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación



7.1 CONCLUSIONES

Las carreteras, como estructura vertebral de las infraestructuras de transporte, juegan un rol importante en el desarrollo económico y social de un país, y no cabe duda que las inversiones destinadas a estas obras deben tratar de rentabilizarse al máximo debido principalmente, a que los presupuestos de los organismos encargados de la construcción y gestión de estas infraestructuras son limitados.

En este contexto, dentro de las estructuras que componen una carretera, las capas de mezcla bituminosa del firme son las que requieren mayor inversión de recursos económicos, ya sea durante su etapa de construcción, como en su etapa de conservación y mantenimiento. Esto último se debe principalmente, a que estas estructuras son solicitadas desde el momento inicial de su construcción por diversos agentes, destacándose por su mayor influencia, las repetidas cargas de tráfico y las condiciones ambientales, los cuales van produciendo un deterioro progresivo a lo largo del tiempo.

En consecuencia, con la finalidad de optimizar los recursos invertidos, se debe tratar de aumentar la vida útil de estas estructuras. Uno de las maneras en que la investigación puede contribuir en este aspecto es mediante el estudio del comportamiento de estos materiales, caracterizando los elementos y propiedades mecánicas que influyen directamente en los deterioros más frecuentes de las mezclas bituminosas, con la finalidad de ampliar el campo del conocimiento y crear instrumentos que apoyen el diseño de mezclas, de manera tal, que se permita asegurar una mayor durabilidad de los firmes a lo largo de su vida de servicio.

Los fallos por fisuración de las mezclas bituminosas son unos de los deterioros más frecuentes en las carreteras y, dentro de ellos, la fisuración por fatiga, lo cual trae consigo serias implicaciones económicas a medida que estos deterioros progresan en el tiempo.

Por ello, el trabajo realizado en esta Tesis Doctoral se ha basado principalmente en el desarrollo de dos líneas de investigación:

- ❖ La primera línea de investigación ha consistido en desarrollar y validar un nuevo procedimiento de ensayo, práctico y fácil de emplear, que tuviera la particularidad de evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas relacionadas con su comportamiento frente al fallo por fisuración.
- ❖ La segunda línea de investigación ha consistido en establecer las posibles relaciones entre las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas obtenidas a partir del nuevo



procedimiento desarrollado y las propiedades obtenidas por los costosos y largos procedimientos de ensayo de fatiga.

Para cumplir con el desarrollo de las líneas de investigación propuestas en el marco de esta Tesis Doctoral, se realizaron las siguientes actividades:

- Revisión exhaustiva en la literatura de los enfoques y modelos utilizados en la actualidad para la representación y análisis de los mecanismos de fisuración.
- Análisis de los procedimientos experimentales desarrollados para evaluar las propiedades de las mezclas asfálticas relacionadas con su resistencia a la fisuración.
- Desarrollo de un nuevo procedimiento que permita evaluar el fallo por fisuración de las mezclas bituminosas utilizadas en un firme y, a su vez, que sea práctico y fácil de emplear y que tuviera la particularidad de no presentar las desventajas de los actuales procedimientos de ensayo utilizados con el mismo objetivo.
- Desarrollo de una metodología para la aplicación del nuevo procedimiento de ensayo, que permita caracterizar y determinar las propiedades mecánicas más influyentes en el fallo por fisuración de las mezclas bituminosas.
- Desarrollo de una campaña experimental para evaluar la factibilidad del procedimiento desarrollado.
- Análisis de los resultados experimentales para validar técnica y estadísticamente la sensibilidad y repetibilidad del procedimiento propuesto.
- Estudio de las propiedades mecánicas a fatiga de diferentes tipos de mezclas bituminosas utilizadas frecuentemente en capas de base e intermedias de estructuras de firmes.
- Análisis de la relación entre las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas obtenidas mediante el nuevo procedimiento propuesto y su comportamiento a la fisuración por fatiga.
- Finalmente, el desarrollo de nuevos instrumentos que permiten el diseño de mezclas bituminosas más resistentes a la fisuración por fatiga.



Los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas a lo largo de esta Tesis Doctoral permiten plantear una serie de valiosas conclusiones, las cuales se han dividido de acuerdo a las líneas de investigación desarrolladas.

Los trabajos de investigación y el análisis de los resultados realizados en la primera línea de investigación, dirigidos a desarrollar y validar un procedimiento para evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas relacionadas con su fallo por fisuración, han permitido establecer las siguientes conclusiones:

Conclusiones generales

- En este trabajo de investigación se ha logrado desarrollar un ensayo práctico que permite determinar las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas relacionadas con su resistencia al fallo por fisuración, el ensayo Fénix.
- El procedimiento de ensayo Fénix es apropiado para simular la respuesta frente a la fisuración que experimentan las mezclas bituminosas en el firme.
- La metodología desarrollada en el ensayo Fénix permite que el procedimiento propuesto tenga una serie de ventajas, entre las cuales se destacan las siguientes:
 - Aplicable tanto a probetas estandarizadas (fabricadas por procedimientos Marshall o mediante compactador giratorio), como a testigos.
 - Requiere una menor cantidad de probetas y testigos.
 - Existe un estado tensional de tracción predominante.
 - Existe un plano de rotura conocido.
 - Fácil montaje de las probetas y rápida ejecución del ensayo.
 - Posee una buena sensibilidad frente a variables relativas a las mezclas bituminosas como son: composición de la mezcla, temperatura de compactación, incorporación de RAP, envejecimiento y temperatura de ensayo.
 - Permite analizar el comportamiento frente a la fisuración de las mezclas mediante sus propiedades de fractura y a su vez analizar la zona de *softening* (postpico).
 - Puede ser aplicado en un amplio rango de temperaturas.



- Mediante el ensayo Fénix se pueden determinar parámetros que representan las principales propiedades mecánicas que caracterizan el comportamiento de las mezclas bituminosas en el firme, como son su rigidez y capacidad de deformación, por medio del cálculo del índice de rigidez a tracción (I_{RT}) y del desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico (Δ_{mdp}).
- La energía disipada en el proceso de fractura, G_D , calculada mediante las curvas carga - desplazamiento obtenidas del ensayo Fénix, permite caracterizar correctamente a las mezclas bituminosas en todo su proceso de fisuración, desde el inicio de la fisura hasta la fractura total.
- El índice de tenacidad, I_T , propuesto en este trabajo, se considera como un buen indicador que permite analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas una vez que ya se ha iniciado la fisura, después de alcanzada su carga máxima, en el área softening.
- El análisis estadístico realizado a partir de los coeficientes de variación calculados y los análisis de varianza (ANOVA) efectuados a los resultados de los principales parámetros obtenidos del ensayo Fénix, han permitido establecer una buena repetibilidad y sensibilidad del ensayo Fénix frente a las variables evaluadas en la etapa experimental.

Conclusiones específicas

- A partir del análisis de los resultados obtenidos en la primera etapa experimental, destinado a validar el procedimiento de ensayo Fénix, se ha establecido cómo variaban las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas en función de las distintas variables, lo que permite concluir lo siguiente:
 - El procedimiento Fénix permite diferenciar claramente el proceso de envejecimiento de una mezcla bituminosa, puesto que las mezclas envejecidas evaluadas en la campaña experimental mostraron un claro aumento de la rigidez de la mezcla (mayor I_{RT}), para cada velocidad de desplazamiento empleada en la etapa preliminar de desarrollo del ensayo, observándose una pérdida de tenacidad (menor I_T). A su vez, se observó una pérdida de capacidad de deformación de las mezclas envejecidas, disminuyendo el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δ_{mdp} .
 - La velocidad de aplicación de carga en el procedimiento de ensayo Fénix fue fijada en 1 mm/min, ya que esta velocidad permite conseguir una mejor relación entre los parámetros de tenacidad y energía disipada en el proceso de fractura,



obteniendo una mayor zona de *softening* o área postpico respecto el total de energía, lo que permite poder realizar un mejor análisis de la zona post rotura de la mezcla. A su vez, la velocidad elegida corresponde a una velocidad intermedia que permite analizar ligantes de diferente dureza o viscosidad.

- Al analizar la variación de los parámetros obtenidos con el ensayo Fénix en función del tipo de betún utilizado en la mezcla y la temperatura de ensayo, se ha puesto de manifiesto el mejor comportamiento del ligante modificado, BM-3c, respecto los ligantes de penetración evaluados. La mezcla fabricada con el betún modificado con polímeros fue capaz de alcanzar mayores deformaciones antes de romper que las mezclas fabricadas con betunes convencionales, disipando una mayor cantidad de energía en su proceso de fisuración (mayor G_D) y mostrando un comportamiento más tenaz (mayor I_T).
- Por otra parte, la sensibilidad mostrada por el procedimiento de ensayo Fénix permite diferenciar claramente el comportamiento de los betunes más blandos de los más duros. Esto queda manifiesto, en el análisis de las mezclas fabricadas con los betunes B60/70 y B13/22, puesto que las primeras presentan una mayor capacidad de deformación (mayor Δ_{mdp}) y una menor rigidez (menor I_{RT}) respecto a las confeccionadas con el ligante más duro, en las temperaturas evaluadas. Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura, las mezclas confeccionadas con el ligante B13/22 aumentan su tenacidad y capacidad de disipar energía, mientras que las mezclas confeccionadas con el ligante de mayor penetración se vuelven menos resistentes.
- El análisis de los resultados del comportamiento de las mezclas en función del contenido de ligante y de la temperatura de ensayo, para los contenidos de ligante evaluados, ha puesto de manifiesto que a medida que se aumenta el contenido de ligante, las mezclas presentan un aumento de capacidad de deformación (mayor Δ_{mdp}) y una pérdida de rigidez (menor I_{RT}), siendo este efecto más marcado en las mezclas con ligantes más blandos. Sin embargo, un punto importante a destacar, es que para el ligante duro B13/22, la pérdida de rigidez es mínima respecto al aumento en la capacidad de disipar energía durante la fractura del material y la ganancia de tenacidad de la mezcla, haciéndola más resistente al proceso de fisuración.
- La sensibilidad del procedimiento de ensayo Fénix se aprecia al analizar la temperatura de compactación de la mezcla, ya que los resultados han puesto de



manifiesto que a medida que se incrementa la temperatura de compactación, y con ello la compacidad de la mezcla, los parámetros relacionados con la resistencia, rigidez, energía disipada y tenacidad de la mezcla, aumentan, reflejando así la importancia de la temperatura de compactación en las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas.

- De manera similar, se ha constatado que el procedimiento propuesto puede evaluar las propiedades de las mezclas recicladas, mostrando el incremento en la rigidez y la disminución en la capacidad de deformación de las mezclas a medida que se incrementa la proporción de RAP en su composición.

Los trabajos de investigación y el análisis de los resultados realizados en la segunda línea de investigación, dirigidos a establecer las relaciones entre las características a fatiga y las propiedades mecánicas entregadas por el ensayo Fénix, han permitido establecer las siguientes conclusiones:

Conclusiones generales

- Se ha podido definir un procedimiento para estimar la ley de fatiga de las mezclas, por medio de las correlaciones obtenidas entre los parámetros de rigidez y capacidad de deformación que entrega el ensayo Fénix y el módulo dinámico y los parámetros de la ley de fatiga obtenidos del ensayo de fatiga a flexotracción en tres puntos.
- El ensayo Fénix permite caracterizar de una manera más fácil y rápida la respuesta de una mezcla bituminosa frente al fallo por fatiga, por medio de los parámetros de energía disipada y tenacidad.

Conclusiones específicas

- Existe una buena correlación entre la rigidez obtenida del ensayo Fénix, I_{RT} , y el módulo dinámico obtenido de la ley de fatiga, M_D .
- Existe una buena correlación entre la rigidez y la capacidad de deformación, I_{RT} y Δ_{mdp} , obtenidas por medio del ensayo Fénix y la pendiente y la deformación en el ciclo 1 de la ley de fatiga, parámetros “b” y “a” respectivamente.
- Las correlaciones anteriores permiten determinar una ley de fatiga a partir de los resultados obtenidos del ensayo Fénix, y calcular así la vida a fatiga de la capa de mezcla bituminosa de un firme mediante los métodos de dimensionamiento analíticos existentes.



- Los parámetros de energía disipada en el proceso de fractura, G_D , e índice de tenacidad, I_T , obtenidos del ensayo Fénix, permiten diferenciar una mezcla de otra en base a su comportamiento a fatiga, presentando un mejor comportamiento aquellas mezclas que presenten valores más altos de estos parámetros para similares rigideces o módulos.

7.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Uno de los principales objetivos para las futuras investigaciones es evaluar, mediante el nuevo ensayo propuesto, las propiedades mecánicas en otra gama de mezclas bituminosas, haciendo variar granulometrías, tipos de ligantes y temperaturas de ensayo, con el fin de caracterizar mecánicamente una mayor tipología de mezclas actualmente utilizadas tanto en España como en otros países.

En futuros trabajos se plantea evaluar el comportamiento a fatiga de un mayor número de mezclas para observar si los parámetros obtenidos en el ensayo Fénix siguen las tendencias y correlaciones encontradas en el desarrollo de esta Tesis Doctoral.

Otros trabajos podrían intentar establecer una relación entre el parámetro de la deformación crítica del ligante asfáltico, obtenida por el reómetro de corte dinámico (DSR) y la tenacidad de la mezcla, obtenida mediante el nuevo procedimiento desarrollado, el ensayo Fénix.



REFERENCIAS



REFERENCIAS

Alonso J. *Estudio del proceso de deformación y agrietamiento por fatiga de mezclas bituminosas sometidas a carga cíclica*. Tesis Doctoral, Escuela de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2006.

Asociación Española de la Carretera, *Anuario de la carretera 2008-2009*, Ediciones Asociación Española de la Carretera, Madrid, España, 2009.

Asphalt Institute. *Hot Mix Asphalt (HMA) Design*, The Asphalt Handbook, Seventh Edition, USA, 2007.

Arabani M. and B. Ferdowsi. *Characterization of Tensile Fracture Resistance of Hot Mix Asphalt Using Semi-Circular Bend Test*. International Journal of Engineering: Basics and Applications, Volume 22, pp. 47-58, 2009.

Baaj H. and H. Di Benedetto. *Effect of Binder Characteristics on Fatigue of Asphalt Pavement Using an Intrinsic Damage Approach*. Road Materials and Pavement Design. Vol. 6, Nº 2, pp. 147-174, 2005.

Barbosa J., F. Araújo and D. Allen. *Considering Material Heterogeneity in Crack Modeling of Asphaltic Mixtures*. In Transport Research Record, Vol. 1832. pp 113-120, 2003.

Braham A., W. Buttlar and M. Marasteanu. *Effect of Binder Type, Aggregate, and Mixture Composition in the Fracture Energy of Hot Mix Asphalt in Cold Climates*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Nº 2001, pp. 102-109, 2007.

Brown R., P. Kandhal and J. Zhang. *Performance Testing for Hot Mix Asphalt*. NCAT Report 01-05, National Center for Asphalt Technology, 2001.

Carpenter S. *Fatigue Performance of IDOT Mixtures*. Research Report FHWA-ICT-07-007, Illinois Center for Transportation, USA, 2006.

Cepeda J. *Análisis del Comportamiento de Mezclas Asfálticas a Fisuración por Fatiga Mediante la Aplicación de un Nuevo Ensayo Dinámico a Tracción Directa*. Tesis Doctoral, Escuela de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2002.

De Solminihaç, H. *Gestión de Infraestructura Vial*. 2ª edición, Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2001.



European Asphalt Pavement Association, *Asphalt in Figures 2007*, 2007.

Di Benedetto H., C. de La Roche, H. Baaj and A. Pronk. *Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution*. Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, pp. 15 – 38, 2003.

Dirección de Vialidad – Ministerio de Obras Públicas. *Manual de Carreteras*, Volumen 7 (Mantenimiento Vial), Chile, 2003.

Erkens S., A. Molenaar and A. Scarpas. *A Better Understanding of Asphalt Concrete Response*, ASCE Engineering Mechanics Conference, Seattle, USA, 2003.

Fakhri M., M. Farokhi, and P. Kheiry. *Modeling of Top-Down Cracking (TDC) Propagation in Asphalt Concrete Pavements Using Fracture Mechanics Theory*. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Vol. 2, pp. 681-692, 2009.

Federal Highway Administration, *Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Program*, Publication N° FHWA-RD-03-031, USA, 2003.

Fonseca C. *Estudio de Capas Antifisuras para Retardar el Inicio y Propagación de Grietas en Pavimentos Flexibles y Semirígidos*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 1995.

Gárnica P., Gómez J. y Sesma J. *Mecánica de Materiales para Pavimentos*, Publicación Técnica N° 197, Instituto Mexicano del Transporte, 2002.

González, J. M., J. Canet, S. Oller, R. Miró. *A Viscoplastic Constitutive Model with Strian Rate Variables for Asphalt Mixtures- Numerical Simulation*, Computational Material Science, Volume 38, p. 543-560, 2006.

Harmelink D. and T. Aschenbrener. *Extent of top-down cracking in Colorado*, Report No. CDOT-DTD-R-2003-7, Colorado Department of Transportation, 2003.

Harvey J. and B. Tsai. *Effects of Asphalt Content and Air Void Content on Mix Fatigue and Stiffness*, Transportation Research Record, National Research Council, Washington, DC, N° 1543, pp. 38-45, 1996.

Hernández J. *Estudio de la Cohesión y la Tenacidad del Betún y su Posible Efecto en el Comportamiento a Fatiga de la Mezcla*. Tesis Doctoral, Escuela de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.



Huang, Y.H. *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, New Jersey, USA, 1993.

Huang B., E. Brian, R. William, Z. Zhang and G. Zuo. *Laboratory Study of Fatigue Characteristics of HMA Surface Mixtures Containing RAP*, In Transportation Research Board, TRB Annual Meeting. CD-ROM, Washington, D.C., USA, 2004.

Ibarrola H. *La Importancia de la Infraestructura Carretera en el Desarrollo Económico de un País*. Rutas, N° 127, pp. 2-3, 2008.

Jajliardo A. *Development of Specification Criteria to Mitigate Top-Down Cracking*. Master Thesis of Engineering, University of Florida, USA, 2003.

Kandhal P. and S. Chakraborty. *Evaluation of Voids in The Mineral Aggregates*, NCAT Report N° 96-4, National Center for Asphalt Technology, USA, 1996.

Kandhal P. and S. Chakraborty. *Effect of asphalt film thickness on short and long term aging of asphalt paving mixtures*, In Transport Research Record, Vol. 1535, pp 83-90, 1996.

Kandhal P. and F. Parker. *The Aggregates' Role in HMA Performance*, Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements, NCHRP Program,. Report 405, 1998.

Kanitpong, K. and H. Bahia. *Relating Adhesion and Cohesion of Asphalts to the Effect of Moisture on Laboratory Performance of Asphalt Mixtures*, Transportation Research Record, Volume 1901, p. 33-43, 2005.

Karihaloo B. *Fracture Mechanics and Structural Concrete*, Longman Scientific and Technical Publishers, John Wiley, USA, 1995.

Keane T. *The Economic Importance of the National Highway System*. Public Road, Vol. 59, N° 4, 1996.

Kim H., M. Partl, M. Wagoner and W. Buttlar. *Size effect investigation on fracturing of asphalt concrete using the cohesive softening Discrete Element Model*, Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Vol.2, pp. 827-836, 2009.

Kim Y., N. Kim and N. Khosla. *Effects of Aggregate Type and Gradation on Fatigue and Permanent Deformation of Asphalt Concrete*, Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, ASTM STP 1147, American Society for Testing Materials, pp. 310–327, 1992.



- Koh C., G. Lopp and R. Roque. *Development of a Dog-Bone Direct Tension Test (DBDT) for asphalt concrete*. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Vol.1, pp. 585-596, 2009.
- Kraemer C., J. Pardillo, S. Rocci, M. Romana, V. Sánchez y M. Del Val. *Ingeniería de Carreteras*. 1ª edición, Ediciones Mc Graw Hill, Madrid, España, 2004.
- Kuai, H., H. Lee, G. Zi and S. MUN. *Application of Generalized J Integral to Crack Propagation Modeling*. In Transportation Research Board, 88th Annual Meeting. CD-ROM, Washington, D.C., USA, 2009.
- Li X., A. Braham, M. Marasteanu, W. Buttlar and R. Williams. *Effect of Factors Affecting Fracture Energy of Asphalt Concrete at Low Temperature*, Third EATA conference 2008, Road Materials and Pavement Design, pp. 397-416, 2008.
- López C. *Curso de Doctorado: Mecánica de Fractura Aplicada a Materiales Causifrágiles*, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2007.
- Lugmayr R., M. Jamek and E. Tshegg. *Mechanism of Fatigue Crack Growth and Fracture Behavior in Bituminous Roads*, Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Vol.2, pp. 807-816, 2009.
- Malan G., P. Straus and F. Hugo. *A Field Study of Premature Surface Cracking in Asphalt*, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 58, pp. 142-162, 1989.
- Mamlouk M. and B Mobasher. *Cracking Resistance of Asphalt Rubber Mix Versus Hot-Mix Asphalt*, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol. 5, pp. 435-452, 2004.
- Martínez A. *Aseguramiento de la Calidad de Mezclas Bituminosas Mediante la Aplicación del Ensayo de Tracción Indirecta en el Control de su Ejecución*, Tesis Doctoral, Escuela de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, 2000.
- Martínez F. *Deterioro en Capas Asfálticas: Fisuración*, Jornadas Técnicas de Actualización y Capacitación en el Área de los Pavimentos Flexibles, Argentina, 2006.
- McGennis R., R. Anderson, T. Kennedy and M. Solaimanian. *Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis*. Publication No. FHWA-SA-95-003, November 1994.



Miró R., Martínez A., Pérez F., and Bianchetto H. Effect of Filler on the Aging Potential of Asphalt Mixtures, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1901, pp. 10 - 17, 2005.

Molenaar J. and A. Molenaar. *Fracture Toughness of Asphalt in The Semi-Circular Bend Test*. 2º Euroasphalt & Eurobitume Congress, pp. 509-517, Barcelona, 2000.

Molenaar A., A. Scarpas, X. Liu and S. Erkens, *Semi-Circular Bending Test; Simple but Useful?*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 71, pp. 795-815, 2002.

Molenaar A., Semi Circular Bending Test, A Useful Tool for Asphalt Mix Characterisation and Quality Control?, Delft University of Technology, 2005.

Monismith, C., J. Epps, and F. Finn, *Improved Asphalt Mix Design*, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 55, pp. 124-132, 1985.

Mull M., K. Stuart and A. Yehia. *Fracture Resistance Characterization of Chemically Modified Crumb Rubber Asphalt Pavement*, Journal of Materials Science, Vol. 37, pp. 557-566, 2002.

Myers L., R. Roque y B. Ruth. Mechanisms of Surface-Initiated Longitudinal Wheel Path Cracks in High-Type Bituminous Pavements. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist. Vol. 67, pp. 401-432, 1998.

Nesnas K. and M. Nunn. A Model For Top-Down Reflection Cracking in Composite Pavements, Fifth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, pp. 409 – 416, 2004.

Oller S. *Fractura Mecánica. Un Enfoque Global*, Centro Internacional de Métodos Numéricos, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2001.

Pais J. and P. Pereira. *Prediction of Existing Reflective Cracking Potential of Flexible Pavements*, Reflective Cracking in Pavements, Research in Practice, 4º International RILEM Conference, 2000.

Pais J., P. Pereira, M. Minhoto, L. Fontes, D. Kumar and B. Silva. The prediction of fatigue life using k1-k2 relationship. 2º Workshop on Four Point Bending, University of Minho, Portugal, 2009.

Pérez F. y A. Bardesi. *Manual para la Caracterización de Ligantes y Másticos Bituminosos*, Ediciones Repsol YPF, España, 2006.



Pérez F., R. Miró y A. Martínez. *Estudio, Diseño y Control de Mezclas Bituminosas*. 1º edición, Ediciones Asociación Española de la Carretera, Madrid, España, 2006.

Pérez F., R. Miró, C. Fonseca. *Essai BTD pour la Détermination de la Ténacité et Résistance à la Fissuration des Mélanges Bitumineux*, Mechanical Test for Bituminous Materials, pp. 391-396, 2000.

Pérez F., R. Miró y A. Martínez. *Caracterización de los ligantes bituminosos a partir de su tenacidad y energía de rotura*. XIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, San José, Costa Rica, 2005a.

Pérez F., R. Miró, A. Martínez, J. Alonso, J. Cepeda y M. Rodríguez. *Desarrollo de un Nuevo Procedimiento para la Evaluación del comportamiento a Fatiga de las Mezclas Bituminosas a Partir de su Caracterización en un Ensayo a Tracción*. Primer Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo. España, 2005b.

Pérez F., R. Miró, A. Martínez y E. Garrote. *Nuevo Procedimiento de Ensayo para Evaluar la Tenacidad de las Mezclas Bituminosas*. Revista Carreteras, Nº 153, 2007.

Pérez F., Miró R., Martínez A. *Empleo del Ensayo de Tracción Indirecta para el Control de Calidad de la Ejecución de Mezclas Bituminosas*, X Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto, Asociación Española de la Carretera, Sevilla, España, pp. 869-878, 1999.

Portillo O. and D. Cebon. *Fracture of Bitumen and Bituminous Mixes*, Oatley Seminar, Cambridge University Engineering Department, 2008.

Pronk, A. and Hompmann, P. *Energy Dissipated: The Leading Factor of Fatigue*. Proceeding of Highway Research Sharing The Benefits, pp. 255-267, 1990.

Racanel C., M. Romanescu, M. Dicu, A. Burlacu and C. Surlea. *Fatigue Lines for Asphalt Mixtures used in Wearing Course*. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Vol.2, pp. 795-805, 2009.

Reyes O. *Análisis del Fallo a Fatiga de los Ligantes Hidrocarbonados: Parámetros que Definen su Comportamiento*. Tesis Doctoral, Escuela de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.

Roberts F., P. Kandhal, E. Ray, D. Lee and T. Kennedy. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA Education Foundation, Second Edition, 1996.



Roque R., B. Birgisson, Z. Zhang, B. Sangpetngam and T. Grant. *Implementation of SHRP Indirect Tension Tester to Mitigate Cracking in Asphalt Pavement and Overlays*, Final Report, Florida Department of Transportation, 2002.

Sengoz B. and E. Agar. *Effect of Asphalt Film Thickness on the Moisture Sensitivity Characteristics of Hot-Mix Asphalt*, Building and Environment, N° 42, pp. 3621–3628, 2007.

Shah S., S. Shwartz and Ch. Ouyang. *Fracture Mechanics of Concrete, Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials*, Wiley-Interscience Publication, New York, USA, 1995.

Shen W. and D. Kirkner. *Thermal Cracking of Viscoelastic Asphalt-Concrete Pavement*. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 127, pp 700-709, 2001.

Sousa J., G. Way and J. Harvey. *Performance-Based Mix Design and Field Quality Control for Asphalt-Aggregate Overlays*. In Transport Research Record, Vol. 1543, pp 46-62, 1996.

Tamames R. *Una Visión Global desde La Economía Ecológica: Desarrollo Sostenido y Desarrollo Sostenible*, La Nueva Cultura de Las Carreteras. Asociación Española de la Carretera. pp. 13-33, 2003.

Tarefder R. and E. Kias. Experimental investigation of crack propagation in asphalt concrete. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Vol.2, pp. 735-748, 2009.

Velásquez R., M. Turos, M. Marasteanu, N. Gibson and T. Clyne. *Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Mixtures using TSRST*, Pavement Cracking: Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories, pp 405-414, 2008.

Wagoner M., W. Buttlar, G. Paulino and P. Blankenship. *Investigation of The Fracture Resistance of Hot-mix Asphalt Concrete Using a Disk-Shaped Compact Tension Test*. In Transport Research Record, Vol. 1929, pp 183-192, 2005a.

Wagoner M., W. Buttlar and G. Paulino. *Disk-shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture*, Experimental Mechanics, Vol. 45, N° 3, pp 270-277, 2005b.



DIRECCIONES ELECTRÓNICAS

HAPI, Asphalt Pavement Guide < www.hawaiiiasphalt.com >

Ministerio de Fomento < www.ministeriodefomento.es >

Pavement Interactive, Asphalt Pavement Guide < www.pavementinteractive.org >

Pavement Tools Consortium < <http://training.ce.washington.edu/PGI/> >